

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA VÝROBNÍCH STROJŮ A KONTRUOVÁNÍ

# KALICÍ LÁZEŇ

Hardening bath

**Student:**

**Radek Gelnar**

**Vedoucí bakalářské práce:**

**Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

**Ostrava 2014**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Gelnar**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení  
Specializace: 21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení  
Téma: **Kalicí lázeň**  
**Hardening Bath**

### Zásady pro vypracování:

Pro potřebu fy ArcelorMittal a.s. navrhnete úpravu kalicí solné lázně s cílem stabilizace její teploty na úrovni 180°C -200°C . Pozornost zaměřte zejména na návrh chladicího zařízení s respektováním max. frekvence kalení výrobků o největší hmotnosti a využití takto definovaného druhotného zdroje energie. Proved'te :

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrženého zařízení a nezbytnými výpočty ve členění – seznam požadavků, funkční struktura, morfologická matice, orgánová a hrubá stavební struktura.
2. 3D model konstrukčního návrhu zařízení.
3. Výrobní výkresovou dokumentaci výměníku.

Rozsah výtahu z rešerše z Bakalářského projektu v textové části práce cca 5str., rozsah výkresové části min. 1A0

### Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

HUBKA, V. *Konstrukční nauka*. Zürich: Heurista, 1995. 105s. ISBN 80-90 1135-0-8

*Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce*. FS\_SME\_05\_003 verze: G

LITERÁRNÍ REŠERŠE – zpracovaná v rámci Bakalářského projektu

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



---

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry




---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

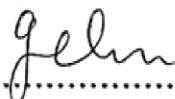
V Ostravě .....19.5.2014.....

..........  
podpis studenta

**Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu u její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014.

.....  
.....  
podpis

Jméno a příjmení: Radek Gelnar

Adresa trvalého bydliště: Hlavní 127

742 83

Česká Republika

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Nogovi, CSc. za pečlivé vedení, poskytnutí odborných rad, ochotu a vstřícný přístup během vypracovávání práce, které mi hodně pomohly k dokončení této práce.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

GELNAR, R. *Kalici lázeň* : bakalářská práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 54 s. Vedoucí práce: Noga, Z.

Bakalářská práce se zabývá návrhem chladicího zařízení, které bude schopno udržovat teplotu kalici lázně během kalení při teplotě 150-180°C. Úvodní část práce seznamuje problematiku chlazení ve firmě Arcelor Mittal a.s., které je velmi nedokonalé. Rešeršní část popisuje stav techniky a různé metody chlazení kalici solné lázně. Dále po zpracování požadavkového listu byla vytvořena funkční struktura a na tomto základě morfologická matice, ze které byl vybrán jeden koncept a byl rozpracován do hrubé stavební struktury, následně pak do čisté stavební struktury. Poslední části práce se zabývá výpočty a dimenzování tepelného výměníku.

### **Klíčová slova:**

Kalici lázeň, tepelný výměník, kalení

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

GELNAR, R. *Hardening tank* : Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2014, 54 p. Thesis head: Noga, Z.

Bachelor thesis presents design of cooling system which will be able to sustain temperature of a hardening tank during hardening at 150-180°C. The introduction of this thesis pursue the problems with cooling in the firm Arcelor Mittal a.s., which is very insufficient. Recherche part of the thesis describes disposition of technology and various methods of cooling the salt tank hardening. Furthermore after processing of requirement list it was created functional structure and on this basis the morfological matrix, from which it was chosen one concept and it was elaborated to rough structural conformation and then to the clear structural conformation. The ending of thesis deal with a calculations and dimensioning of heat exchanger.

### **Keywords:**

Hardening tank, heat exchanger, hardening

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Rešerše.....</b>	<b>7</b>
2.1 Kalení.....	7
2.2 Kalicí lázně.....	8
2.2.1 Druhy kalicích prostředí.....	8
2.3 Složení soli AS 140.....	10
2.4 Výměník tepla.....	10
2.4.1 Dělení výměníku.....	11
2.5 Patentová rešerše.....	11
2.6 Výpočtová rešerše.....	14
2.7 Metody chlazení kalicí lázně.....	16
2.8 Výhoda použití tepelného výměníku.....	17
<b>3. Návrh postupu při konstruování.....</b>	<b>18</b>
3.1 Vyjasnění a rozpracování požadavků.....	18
3.2 Stanovení funkční struktury.....	20
3.3 Stanovení orgánové struktury.....	22
3.4 Stanovení hrubé stavební struktury.....	24
3.5 Stanovení úplné stavební struktury.....	27
3.6 Detailování úplné stavební struktury.....	28
<b>4. Výpočtová zpráva.....</b>	<b>30</b>
4.1 Vstupní data.....	30
4.2 Proudění tekutin v tepelném výměníku.....	31
4.2.1 Režim proudění.....	31
4.2.2 Laminární proudění.....	31
4.2.3 Turbulentní proudění.....	32



4.3 Dimenzování tepelného výměníku.....	32
4.3.1 Výpočet tepelného toku procházející oleje vnitřní trubkou.....	33
4.3.2 Výpočet tepelného toku soli AS 140 procházející výměníkem.....	36
4.3.3 Výpočet teplosměnné plochy.....	39
4.3.4 Výpočet tlakových ztrát.....	42
<b>5. Využití odvedeného tepla.....</b>	<b>46</b>
<b>6. Závěr.....</b>	<b>48</b>
<b>7. Seznam výkresové dokumentace.....</b>	<b>49</b>
<b>8. Seznam internetových zdrojů.....</b>	<b>49</b>
<b>9. Seznam použité literatury.....</b>	<b>51</b>
<b>10. Seznam příloh.....</b>	<b>51</b>
<b>11. Seznam obrázků.....</b>	<b>52</b>
<b>12. Přílohy.....</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých znaků

$A_1$	průtočná plocha v mezitrubkovém systému	$[m^2]$
$A_2$	průtočná plocha v trubkovém systému	$[m^2]$
$A_2'$	průtočná plocha jedné trubky	$[m^2]$
$B$	rozteč přepážek	$[m]$
$L$	délka potrubí	$[m]$
$N_p$	počet přepážek	$[-]$
$N_t$	počet potrubí	$[-]$
$Nu$	Nusseltovo kritérium	$[-]$
$O$	obvod průtočné plochy	$[m]$
$P$	tepelný výkon	$[W]$
$Pr$	Prandtlovo kritérium	$[-]$
$Q$	odvedené teplo	$[W]$
$Q_{TUV}$	potřeba tepla pro ohřev TUV	$[W/h]$
$Re$	Reynoldsovo kritérium	$[-]$
$S$	teplosměnná plocha	$[m^2]$
$T_1$	vstupní teplota horké tekutiny	$[^{\circ}C]$
$T_2$	výstupní teplota horké tekutiny	$[^{\circ}C]$
$V_p$	celková potřeba teplé vody	$[m^3/den]$
$a_o$	součinitel teplotní vodivosti oleje	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$a_s$	součinitel teplotní vodivosti soli AS 140	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$c_{pH_2O}$	měrná tepelná kapacita vody	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pm}$	měrná tepelná kapacita materiálu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{po}$	měrná tepelná kapacita oleje	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{ps}$	měrná tepelná kapacita soli AS140	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$d_H$	hydraulický průměr	$[m]$
$d_1$	vnější průměr potrubí	$[m]$
$d_2$	vnitřní průměr potrubí	$[m]$
$f$	součinitel tření ocelové trubky	$[-]$
$k$	střední součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\dot{m}_o$	hmotnostní průtok oleje	$[Kg \cdot s^{-1}]$
$\dot{m}_s$	hmotnostní průtok soli AS 140	$[Kg \cdot s^{-1}]$
$m_m$	hmotnost materiálu	$[Kg]$

$m_o$	hmotnost oleje	[Kg]
$m_s$	hmotnost soli AS140	[Kg]
$r_2$	vnitřní poloměr potrubí	[m]
$t_{ovystup}$	výstupní teplota oleje	[°C]
$t_{ovstup}$	vstupní teplota oleje	[°C]
$t_1$	vstupní teplota chladné tekutiny	[°C]
$t_{1H2O}$	teplota studené vody	[°C]
$t_2$	vstupní teplota chladné tekutiny	[°C]
$t_{2H2O}$	teplota ohřáté vody	[°C]
$w_o$	rychlost proudění oleje	[m·s <sup>-1</sup> ]
$w_s$	rychlost proudění soli AS 140	[m·s <sup>-1</sup> ]
$z$	koeficient energetický ztrát v systému	[-]
$\alpha_s$	součinitel přestupu tepla soli AS140	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_o$	součinitel přestupu tepla oleje	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\Delta p_{z,c}$	celkové tlakové ztráty	[Pa]
$\Delta p_{z,tř}$	tlakové ztráty třením	[Pa]
$\Delta p_{z,m}$	tlakové ztráty místními odpory	[Pa]
$\overline{\Delta t}$	střední logaritmický rozdíl teplot	[°C]
$\Delta t_1$	teplotní rozdíl na vstupu do výměníku	[°C]
$\Delta t_2$	teplotní rozdíl na výstupu do výměníku	[°C]
$\Delta t_m$	rozdíl teplot materiálu před a po kalení	[°C]
$\Delta t_o$	rozdíl teplot oleje	[°C]
$\Delta t_s$	rozdíl teplot soli AS 140	[°C]
$\lambda_m$	součinitel tepelné vodivosti oceli	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_o$	součinitel tepelné vodivosti oleje	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_s$	součinitel tepelné vodivosti soli AS 140	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\nu_o$	kinematická viskozita oleje	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\nu_s$	kinematická viskozita soli AS 140	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\zeta$	ztrátový součinitel místními odpory	[-]
$\Pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\rho_m$	hustota materiálu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_o$	hustota oleje	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	hustota soli AS 140	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{H2O}$	hustota vody	[kg·m <sup>-3</sup> ]

## 1. Úvod

Ve firmě Arcelor Mittal a.s. je v provozu kalící solná lázeň, mimochodem největší kalící lázeň v ČR, která umožňuje najednou kalit vsázku až 10 tun. Tato kalící nádrž je při kalení chlazená vodou. Tato metoda je ale méně efektivní a při vypařování vody z lázně, přičemž strhává sebou kapky soli a ta tímto způsobem uniká ze solné lázně. Ulpívá tak na konstrukcích hal a zhoršuje ovzduší na halách. Tím zhoršuje i životní prostředí. Proto byl dán návrh na nové zařízení umožňující lepší a efektivnější chlazení solné kalící lázně.

Mým úkolem je navrhnout tedy zařízení, které bude efektivně odvádět teplo ze solné lázně a následného využití odvedeného tepla. Dále, udržet teplotu lázně v rozmezí 180° - 200°C. Nový způsob ochlazování solné lázně přinese zlepšení jak ekologických tak jakostních parametrů.

Cílem realizace bude zlepšení kvality tepelného zpracování, rovnoměrnost teploty v celém objemu kalící lázně, rovnoměrnost ochlazovací rychlosti, šetrný způsob chlazení, prodloužení životnosti solné taveniny – aspekt mající vliv na minimální snížení tzv. opaků (opakování tepelného režimu daného výrobku z důvodu nekvalitního zakalení v solné lázni) a tím zvýšení nákladů na výrobu. Dále zlepšení ochrany životního prostředí, odstranění ulpívání soli na výrobcích a konstrukcích přilehlých hal, splnění emisních norem v pracovním prostředí jednotlivých hal strojírny, a dále úspora finančních prostředků, snížením spotřeby kalících soli – sůl unikající ve formě aerosolu.

Jedna z variant, chlazení kalící lázně, které by mohlo být zrealizováno, bude prováděno pomocí trubkového chladiče s chladicím médiem - studená voda cirkulující přes chladič, ponořený do taveniny a soustavným promícháváním dané taveniny. Promícháváním solné taveniny bude prováděno pomocí dvou lopatkových míchadel. Lopatková míchadla budou proti sobě připevněna k masivní ocelové konstrukci, která bude připevněna k hranám kalící vany, přitom bude každopádně dodržen minimální užitečný prostor pro kalení běžných vsázek (95% prostoru). V případě kalení větších vsázek bude konstrukce vyjmuta z lázně pomocí jeřábu. Trubkový chladič bude umístěn kolem míchadla tak, aby přenos ochlazené taveniny do prostoru lázně byl co nejefektivnější.

Další varianta, která bude vybrána pro chlazení kalící lázně, je chlazení za pomoci výměníku tepla. Výměník tepla s U-trubkovým svazkem uvnitř pláště je zkonstruován pomocí dvou prostorů (trubkového a mezitrubkového), v každém z prostorů proudí pracovní médium, díky tomu se média mezi sebou nemísí. Výměník bude umístěn v bezprostřední blízkosti kalící lázně z vnější strany, z důvodu zabránění prostoru v lázni,

které by se zmenšilo na 1/4. Součástí této varianty bude tepelný výpočet a dimenzování výměníku.

Kalící nádrž je udržována při teplotách 180°C-200°C, což zajišťují plynové hořáky na podélné straně kalící lázně. A aby se lázeň rychle neochlazovala, v době kdy se nekalí, je tato kalící solná lázeň opatřena víkem.

## **2. Rešerše**

### **2.1 Kalení**

Kalení je jeden ze způsobů tepelného zpracování kovů, kdy materiál získává lepší mechanické a fyzikální vlastnosti. Při kalení se výrobek ohřeje na určitou teplotu a následně prudce schladí. Kalíme proto, aby výrobek dosáhl vyšší tvrdosti a odolnosti proti opotřebení.

Při kalení, je potřeba sledovat a řídit ochlazování ocele tak, aby nedošlo v perlitické nebo bainitické oblasti k přeměně a austenit zůstal nepřeměněn až k teplotě  $M_s$ , to znamená, že rychlost ochlazování musí být větší než tzv. rychlost kritická, která závisí na chemickém složení austenitu. [B]

#### **Základní pojmy**

##### **- Kalitelnost**

Je to schopnost materiálů dosáhnout kalením určité tvrdosti. Kalit se dají jen oceli obsahující nad 0,35% uhlíku. U legovaných ocelí se obsah uhlíku snižuje, a je to dáno díky přísadám legujících prvků v oceli. [5]

##### **- Prokalitelnost**

Je schopnost oceli dosáhnout tvrdosti, odpovídající její kalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kalené součásti. [5]

##### **- Zakalitelnost**

Je nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli, která je dána tvrdostí martenzitu. [5]

#### **Fáze chlazení**

##### **Fáze parního povlaku**

Vzniká bezprostředně při ponoření součásti do lázně vlivem velkého rozdílu teplot mezi součástí a kalícím prostředkem. Na povrchu součástí vzniká parní povlak, který svými izolačními vlastnostmi brání přestupu tepla a proto je rychlost ochlazování v této fázi malá. Délka této fáze má však při kalení nízkolegovaných a nelegovaných ocelí rozhodující vliv na výsledné vlastnosti součásti (tvrdost, pnutí, strukturu a deformace). [6]

##### **Fáze varu**

Vzniká po rozpadu parního povlaku. V této fázi dochází k vypařování kalícího prostředku na povrch součásti a rychlost ochlazování dosahuje maximálních hodnot. [6]

### **Konvekční fáze**

Vzniká při ukončení varu. Intenzitu ochlazování v této fázi můžeme zásadním způsobem ovlivnit cirkulací kalícího prostředí. [6]

## **2.2 Kalící lázně**

Kalící lázně slouží ke kalení součástí, přičemž součásti získávají lepší mechanické a fyzikální vlastnosti (materiál získává tvrdost, ale stává se křehčí).

V současné době je ve firmě Arcelor Mittal prováděno kalení tepelně zpracovaných součástí do lázně kalící soli AS140 (obsah cca 20m<sup>3</sup>), která se udržuje při teplotách 180°C - 200°C, za přítomnosti vody, která je přimíchávána do kalící solné lázně za účelem chlazení dané lázně, které je velmi nedokonalé. Při dopadu vody na solnou lázeň, tato se prudce ohřívá, odpařuje se a uniká do ovzduší kalírny, přičemž strhává sebou kapky soli, která ulpívá na výrobcích středisek v přilehlých halách a konstrukcích hal a střešních konstrukcí. Takto uniklá kalící sůl ze solné lázně, zhoršuje životní prostředí na jednotlivých halách a tento úlet se projeví i ve spotřebě dané kalící soli.

Za současného stavu technologického vybavení kalírny pro kalení do solné lázně soli AS 140 a k posouzení možností technologického zlepšení kalení do solné lázně s ohledem na kvalitu, ochranu životního prostředí a úspor ve spotřebě kalící soli by bylo nejlepším a nejefektivnějším řešením navrhnout ochlazování solné taveniny pomocí trubkového chladiče, tepelného výměníku, nebo jiného efektivnějšího zařízení.

### **2.2.1 Druhy kalících prostředí**

Kalící prostředí je velmi důležitou volbou při tepelném zpracování oceli, protože má finální vliv na jakost materiálů. [B]

#### **Vzduch**

Je to nejmírnější kalící prostředí. Používá se pouze u samokalitelných oceli.

#### **Voda**

Je nejčastějším kalícím prostředkem. Kalí se především nelegované a nízkolegované oceli.[6] Voda se charakterizuje poměrně velkou ochlazovací schopností, ale také rychlým ochlazováním povrchu materiálů při nízkých teplotách, proto vznikají na výrobcích kalených do vody často praskliny.

### **Olej**

Oleje tyto vady, jako je kalení ve vodě, nemají, ale charakterizují se menší ochlazovací schopností. Je to nejrozšířenější kalící prostředí. Doba ochlazování je závislá na druhu oleje. Nevýhodou olejů je, že je hořlavý. Proto se teplota oleje musí udržovat pod hranicí bodu vzplanutí. Musí se zabránit vniknutí vody do lázně, zajistit odsávání vznikajícího kouře při kalení a také zajistit co nejrychlejší vsunutí vsázky do lázně. [6]

### **Polymery**

Polymery se používají tam kde z technologických, nebo jakýchkoli důvodů nelze použít voda ani olej. Jejich výhodou je, že jsou nehořlavé, nevznikají olejové páry, kouře ani saze při kalení. Povrch kalených součástí není znečištěn spáleným olejem. Součásti se nemusí oplachovat (prát), protože zbytky polymeru při vysokých teplotách shoří na oxid uhličitý a vodní páru. Provoz i cena takovéto lázně jsou oproti olejové nižší. Nevýhodou je, že jsou náročnější na kontrolu, nejsou vhodné pro uzavřené kalící lázně a hlavně její čistota ovlivňuje životnost lázně. [7]

Princip účinku polymerních roztoků je založen na vytvoření izolační vrstvy na povrchu kalící součásti, která snižuje dobu ochlazování. Po ochlazení se vytvořená vrstva rozpustí, a proto povrch součásti zůstává čistý. [6]

### **Soli**

Solné prostředí se svou schopností přibližuje olejům. Solnou lázeň poznáte na první pohled tak že je teplá, její složení nedovoluje mít nízkou teplotu, protože by začala tuhnout. Proto se teplota lázně musí udržovat kolem 170°C -250°C. Solné kalící lázně jsou vybaveny víky, aby lépe udržely teplotu lázně, a výhřev lázně zajišťují plynové hořáky. Výhodou je menší pnutí součástí při kalení než u jiných druhů kalení.

### **Kalící emulze**

U kalících emulzí se využívá jejich výrazného prodloužení fáze parního povlaku pro velmi malé rychlosti ochlazování. Kalící emulze se u kalení používají zřídka, například sprcha po indukčním nebo povrchovém kalení. [6]



## 2.3 Složení soli AS140

- 45%  $\text{NaNO}_2$
- 10%  $\text{NaNO}_3$
- 45%  $\text{KNO}_3$

**$\text{NaNO}_2$ :** Dusitan sodný je sodnou solí kyseliny dusité. Je to světle nažloutlá krystalická látka, velmi dobře rozpustná ve vodě. Hustota:  $2,17 \text{ g/cm}^3$  při  $0^\circ\text{C}$ . Molární hmotnost:  $68,9953 \text{ g/mol}$ . Teplota tání:  $271^\circ\text{C}$ . Teplota rozkladu:  $520^\circ\text{C}$ . [1]



Obr. 1 – Dusitan sodný [1]

**$\text{NaNO}_3$ :** Dusičnan sodný je chemická sloučenina, vyskytující se v přírodě v podobě nerostu nitronatridu. Je bezbarvý, bílý, šedý nebo zbarvený do žluta nebo do hněda. Hustota:  $2,26 \text{ g/cm}^3$ . Molární hmotnost:  $84,9947 \text{ g/mol}$ . Teplota tání:  $308^\circ\text{C}$ . Bod varu:  $380^\circ\text{C}$ . [2]



Obr. 2 - Dusičnan sodný [2]

**$\text{KNO}_3$ :** Dusičnan draselný je draselná sůl kyseliny dusičné. Je buď ve formě prášku, nebo krystalků. Molární hmotnost:  $101,1032 \text{ g/mol}$ . Hustota  $2,11 \text{ g/cm}^3$ . Bod tání:  $334^\circ\text{C}$ . Teplota rozkladu  $400^\circ\text{C}$ . [3]



Obr. 3 - Dusičnan draselný [3]

## 2.4 Výměníky tepla

Jsou zařízení, které slouží k výměně energie mezi soustavami a objekty o různých parametrech. Zajišťuje distribuci tepla pro vytápění objektů a ohřev teplé vody.

V domácnostech se s výměníky setkáme u topných soustav (kotel, radiátory), v chladničkách (výparník a kondenzátor) a v klimatizačních jednotkách. Ve většině automobilů pak s chladičem motoru a výměníkem pro topení kabiny. [4]

### 2.4.1 Dělení výměníku

a) Podle pracovního média:

- Beze změny fáze (např. výměník vzduch-vzduch, spaliny-voda, olej-voda)
- Se změnou fáze (v nich dochází ke změně skupenství, tj. kondenzaci nebo odpařením, jedné látky, např. kondenzátor páry chlazený vodou)

b) Podle konstrukce teplosměnné plochy:

- Trubkové
- Deskové

## 2.5 Patentová řešení

- Vodní chlazení solné lázně

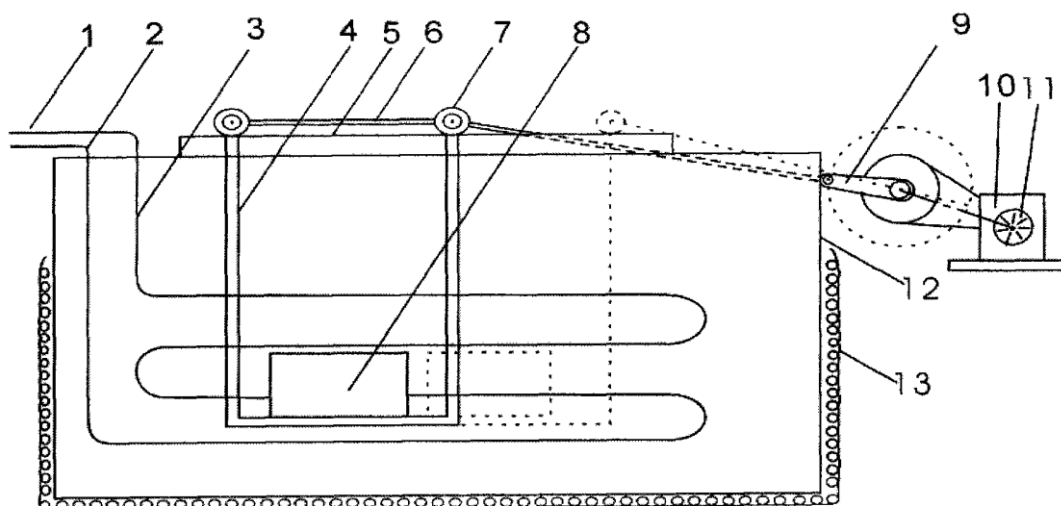


Schéma 1 - Vodní chlazení solné lázně [8]

Popis: 1-vstupní potrubí, 2-výstupní potrubí, 3-hadovité chladicí potrubí, 4-držák obrobku, 5-dráha, 6-mobilní rám, 7-váleček, 8-obrobek, 9-kyvný mechanismus, 10-redukce, 11-motor, 12-nádrž, 13-topné těleso.

Vynález popisuje vodní chlazení kalici solné lázně. Strany nad solnou lázní jsou opatřeny drahami a pohyblivou polici s valivými kolečky, které jsou uspořádány v drahách. Pohyblivá police se ve vaně pohybuje tam a zpět pomocí kyvným mechanismem a prostřednictvím pohyblivého rámu míchá solnou lázeň, což vede k rychlému odvodu tepla a chlazení obrobků a rovnoměrné teplotě solné lázně. Chlazení umožňují chladicí trubky ve tvaru hada, ve kterých cirkuluje chladicí voda. To plní funkci

odvodu tepla, chlazení solné lázně a rychle vrací lázeň do nastavené teploty izotermického kalení. Výhoda je jednoduchá konstrukce, pohodlné ovládání.

- Chladič pro kalení lázně [9]

Popis: 1-vnější trubka, 2-vnitřní trubka, 41-roztavená sůl, 9-nádrž chladicí vody, 22-větrací otvory, 13-odpařovací zásobník, 12-přípojné potrubí

Zařízení umožňuje chlazení lázně. Ponořená část zařízení se skládá z vnitřní a vnější trubky, ve vnitřní trubce protéká chladicí voda, kde se následně odpařuje, vlivem tepla, které vznikne sáláním od vnějšího potrubí, které je ve styku s roztavenou soli. Generované páry se odvádí z větracích otvorů, vytvořených na vnitřní trubce přes vnější potrubí do nádrže chladicí vody. Chladicí voda je dodávána z nádrže do vnitřní trubky od horního konce.

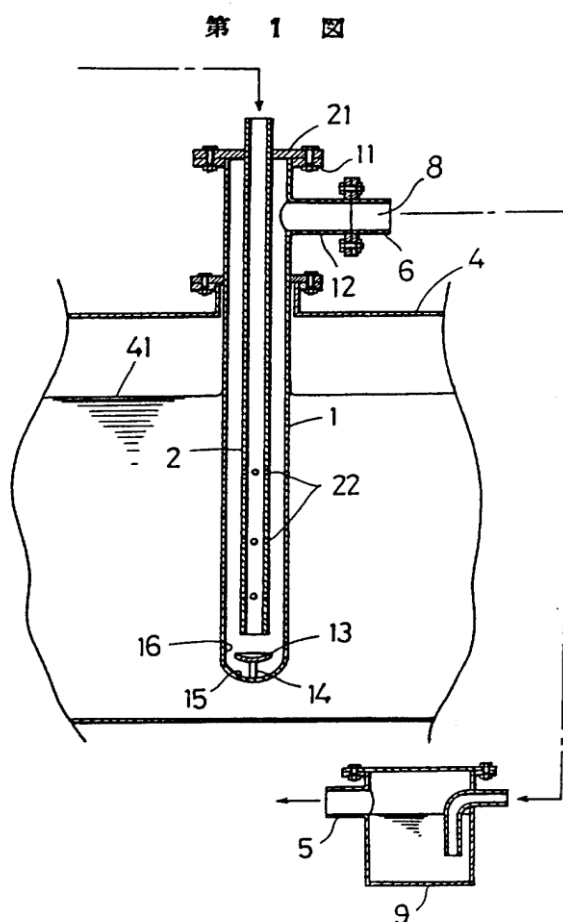


Schéma 2 - Chladič pro kalení lázně [9]

- Chladicí zařízení pro kalení [10]

Popis: 1-zvedací hák, 2-tyč, 3-zdvihací válec, 5-nepohyblivý člen, 6-válcový člen, 7-drážky, 8-výstupky, 9-závěs, 10- ponořené zařízení, 11-koš, 12-sůl, 13-solná lázeň, 14-ložiska, 15-kotouč.

Koš se zařízením je zavěšen na závěsu se zvedacím hákem, který se sníží a koš se zařízením ponoří do solné lázně. Zdvihací válec se pak uvede do činnosti. Válcový člen je spojen prostřednictvím ložiska, kotouče a vačkové drážky. Otáčením kotouče válcový člen s tyčí klesá a stoupá. Na druhé straně je sůl míchána míchadlem tak, aby se v ní vytvářela turbulence.

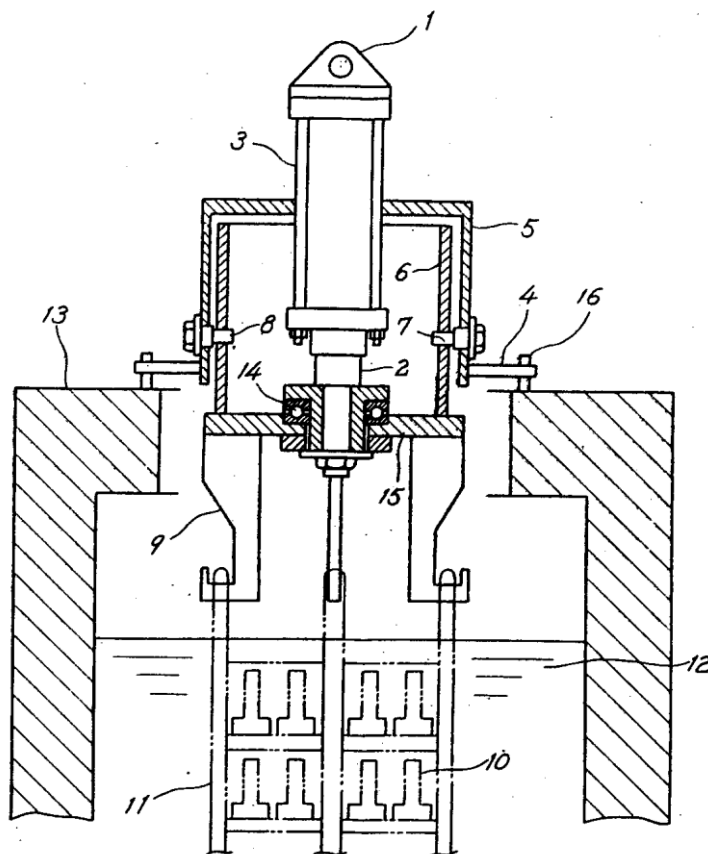


Schéma 3 - Chladicí zařízení pro kalení [10]

- Způsob a chladicí zařízení pro kalení [11]

Popis: 1-zátka, 2-zvedací hák, 3-tyč, 4-zvedací válec, 5-válcový člen, 6-stacionární prvek, 7-výstupek, 8-vačková drážka, 9-závěs, 10-zařízení, 11-koš, 12-sůl, 13-solná lázeň, 14-ložiska, 15-kotouč, 17-spínač.

Princip: (viz. Chladicí zařízení pro kalení [10] )

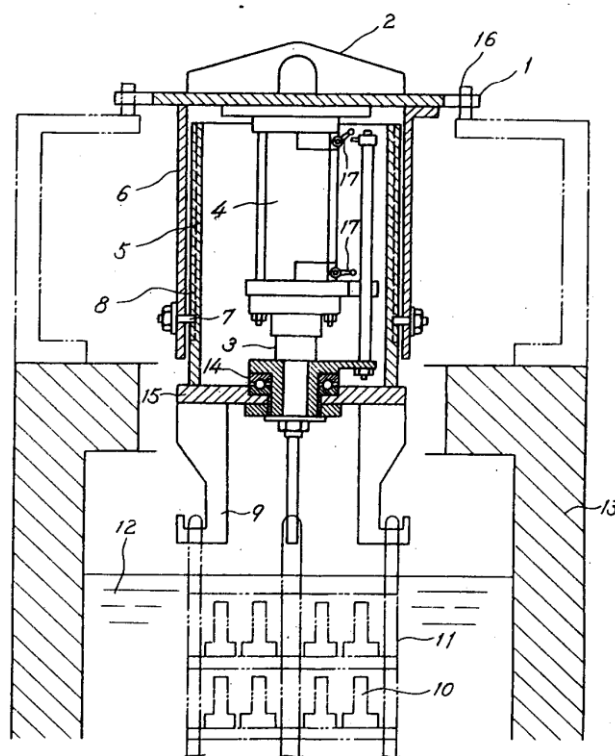


Schéma 4 - chladicí zařízení pro kalení [11]

## 2.6 Výpočtová řešení

### Základní výpočtové vztahy

Základním vztahem pro tepelnou bilanci látky v prostoru výměníku je kalorimetrická rovnice ve tvaru dle [C]:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t, [W]. \quad (1)$$

Rovnice 2 pro výpočet středního logaritmického teplotního spádu

$$\overline{\Delta t} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}, [^{\circ}\text{C}, \text{K}]. \quad (2)$$

kde:  $T_1$ ... vstupní teplota horké tekutiny [ $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ]  
 $T_2$ ... výstupní teplota horké tekutiny [ $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ]  
 $t_1$ ... vstupní teplota chladné tekutiny [ $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ]  
 $t_2$ ... výstupní teplota chladné tekutiny [ $^{\circ}\text{C}, \text{K}$ ]

Výkon tepelného výměníku je určen rovnicí 3

$$Q = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t}, [W] \quad (3)$$

kde:  $k$ ... součinitel prostupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $S$ ... teplosměnná plocha [ $\text{m}^2$ ]

Teplosměnná plocha se určuje rovnicí 4

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot N_t \cdot L, [\text{m}^2] \quad (4)$$

kde:  $r_2$ ... vnitřní průměr trubky [m]  
 $N_t$ ... počet trubek [-]  
 $L$ ... délka trubky [m]

Počet přepážek je určen rovnicí 5

$$N_p = \frac{L}{B} - 1, [-] \quad (5)$$

kde:  $B$ ... rozteč přepážek [m]

Mezi základní vztahy tepelného výměníku patří i Reynoldsova rovnice – rovnice 6, Nusseltova rovnice - rovnice 7 a Prandtlova rovnice – rovnice 8 dle [F].

$$Re = \frac{w \cdot d_H}{\nu} , [-] \quad (6)$$

kde:  $w$ ... rychlost proudění tekutiny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $\nu$ ... kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $d_H$ ... hydraulický průměr [m]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_H}{\lambda} , [-] \quad (7)$$

kde:  $\lambda$ ... tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $\alpha$ ... součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$$Pr = \frac{\nu}{a} , [-] \quad (8)$$

kde:  $a$ ...součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Výpočet součinitele prostupu tepla  $k$ , je určen rovnicí 9, který vyjadřuje přenos tepla prouděním z prostoru s větší teplotou do prostoru s menší teplotou a přenos tepla vedením přes teplosměnnou plochu.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \cdot \alpha_2}} , [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9)$$

kde:  $\alpha_1$ ... součinitel přestupu tepla na straně teplejší tekutiny [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $d_1$ ... vnější průměr potrubí [m]  
 $\lambda_m$ ... tepelná vodivost materiálu trubky [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $\alpha_2$ ... součinitel přestupu tepla na straně chladnější tekutiny [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $d_2$ ... vnitřní průměr potrubí [m]

Celkové tlakové ztráty se vyjádří rovnicí 10 dle [H], je charakterizována třecími ztrátami rovnicí 11 dle [H], a místními odpory rovnicí 12 dle [H].

$$\Delta p_Z = \Delta p_{Z,tř} + \Delta p_{Z,m} , [Pa] \quad (10)$$

Ztráta tlaku třením:

$$\Delta p_{Z,tř} = \frac{f \cdot L \cdot w^2 \cdot \rho}{d_H \cdot 2} , [Pa] \quad (11)$$

kde:  $f$ ... součinitel tření trubky [-]  
 $\rho$ ... hustota kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Tlakové ztráty místními odpory:

$$\Delta p_{z,m} = \frac{\zeta \cdot w^2 \cdot \rho}{2} , [Pa] \quad (12)$$

kde:  $\zeta$ ...ztrátový součinitel místními odpory [-]

## 2.7 Metody chlazení kalicí lázně

- **Za pomoci tepelné trubice**

Tepelné trubice (anglicky heat pipe) jsou zařízení, která se používají pro účinný a rychlý přenos tepla, protože mají velmi nízký tepelný odpor. Teplo je přenášeno parami pracovní látky z teplejšího místa (výparník) do studenějšího (kondenzátor). Výhoda tepelných trubic je jejich malý rozměr i pro přenos velkých výkonů, další z výhod je jejich dlouhá životnost (minimálně 20 let) a bezúdržbový provoz (s výjimkou případného čištění vnějších teplosměnných ploch).

### Princip

Jedná se o vzduchotěsně uzavřenou trubici, v níž je pracovní látka (voda, alkohol, aceton, oxid uhličitý apod.). Začneme-li jednu stranu ohřívat, začne se pracovní látka odpařovat a vzrůstá tlak. Na druhém konci, kde je umístěný chladič se pára začne kondenzovat (zkapalnění páry) a předávat teplo, které bylo spotřebováno k odpaření. Zkapalněná pára teče zpět. A tento proces se stále opakuje. Přenášený výkon je stanoven rychlostí

### Konstrukce

Tepelné trubice jsou nejčastěji vyráběné buď měděné, nebo ocelové, které jsou na obou koncích zapájeny nebo zavařeny. Uvnitř trubice se nachází malé množství kapalné pracovní látky a zbytek místa je vyplněn jejími parami. Při používání tepelných trubic musí být ohříváný konec níže a chlazená část výše, aby zkapalněná pára mohla stékat zpět. Toto řešení se používá na vzdálenosti i několika metrů. Existují i výjimky kdy ohříváný konec může být o něco výše než chlazený, ale vnitřní stěna trubice musí být upravena tak,

aby po ní kapalina vzlínala (jemné podélné drážky, výstelka z drátěné sítě, různých porézních materiálů apod.).



Obr. 4 - princip tepelné trubice [12]

- **Za pomoci trubkového elementu**

Trubkový element plní podobnou funkci, co se týče chlazení jako tepelné trubice, ale mají odlišný princip.

### **Princip**

Jedná se o potrubí patřičného tvaru, kterým cirkuluje studená tlaková voda, popřípadě jiné chladicí médium (olej,...). Při zahřívání potrubí, se studená tlaková voda v potrubí ohřívá, odebírá tím tak okolnímu prostředí teplo, a odvádí ho pryč. Tento proces se stále opakuje. Odvedené teplo se může dále využít například pro ohřev teplé užitkové vody, vytápění na halách a podobně.

## **2.8 Výhoda použití tepelného výměníku**

Jedna z výhod použití tepelného výměníku v solné kalící lázni je ta, že momentálně je lázeň chlazená vodou a prodleva mezi prvním a druhým kalením je několik hodin, aby se ze soli odpařila většina vody a teplota lázně se ustálila na požadovanou teplotu kalení. Chlazením pomocí tepelného výměníku by nemuseli být žádné prodlevy, protože by se lázeň rapidně neohřívala a nebyla by chlazená vodou, tudíž by se nic neodpařovalo.



### **3. Návrh postupu při konstruování**

#### **3.1 Vyjasnění a rozpracování požadavků**

- Výměník by měl zabírat minimální prostor v nádrži (kdyby měl být do ní ponořen)
- Zlepšení kvality tepelného zpracování
- Rovnoměrnost teploty v celém objemu kalicí nádrže
- Rovnoměrnost ochlazovací rychlosti
- Šetrný způsob chlazení
- Zlepšení jakosti kalených dílů
- Prodloužení životnosti solné taveniny
- Zlepšení ochrany životního prostředí
- Odstranění ulpívání soli na výrobcích a konstrukcích přilehlých hal
- Splnění emisních norem v pracovním prostředí jednotlivých hal strojírní
- Úspora finančních prostředků snížením spotřeby kalících solí
- Minimální prodlevy mezi kalením

#### **Seznam funkcí technického systému**

- Vložení vsázky s roštem do lázně
- Ochlazování solné kalicí lázně pomocí tepelného výměníku
- Ochlazování bez pomocí přimíchávání vody do lázně
- Odnímatelné víko na udržení teploty v lázni
- Využití odvedeného tepla na užitkovou vodu
- Přívod chladicí kapaliny ve výměníku
- Regulace kapaliny ve výměníku
- Měření teploty solné lázně
- Poloha výměníku v lázni, popřípadě mimo ní

### Požadavkový list

SPECIFIKACE POŽADAVKU	PODMÍNKA	PŘÁNÍ
<u>Funkce, Účinky a funkční parametry:</u> Využití odvedeného tepla Bezpečné uchycení výměníku	<b>X</b>	<b>X</b>
<u>Tepelný výměník:</u> Materiál: Nerezový Odolný vůči soli AS 140 Velikost: 6x0,7 m Hmotnost: Tvar: Výměník s U-trubkovým svazkem v plášti	<b>X</b> <b>X</b>	
<u>Provoz:</u> Četnost použití: vyšší Životnost: minimálně 10 let Údržba: minimální žádná	<b>X</b> <b>X</b>	<b>X</b> <b>X</b>
<u>Ergonomie:</u> Bezpečnost proti poranění	<b>X</b>	
<u>Povrch:</u> Barevně nenápadný	<b>X</b>	
<u>Manipulace:</u> Přemisťování: s pomocí jeřábu	<b>X</b>	
<u>Předpisy a normy:</u> Bez porušení patentových zpráv Nejsou zvláštní předpisy a normy	<b>X</b>	

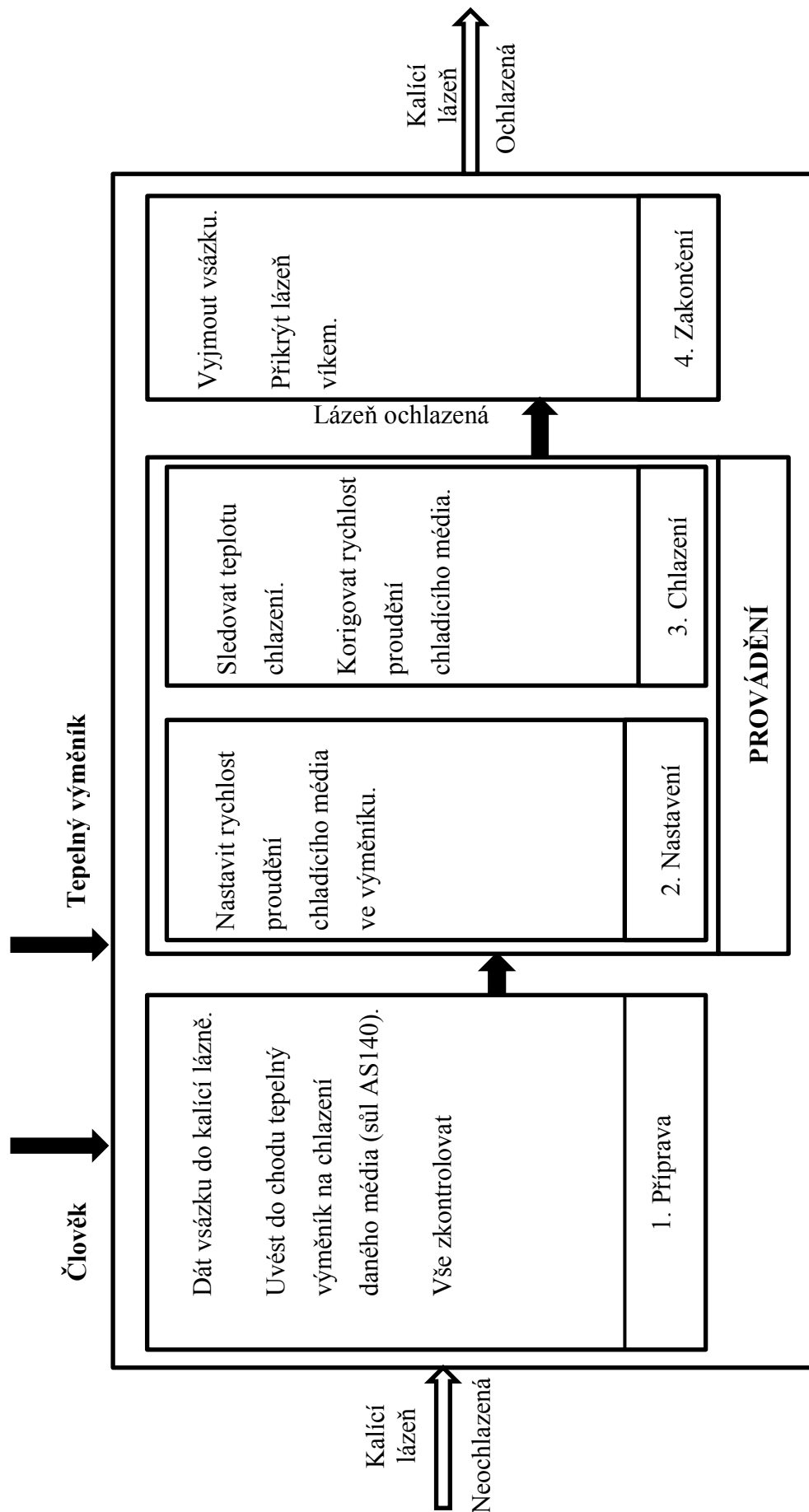
<u>Výroba:</u> Kusová		
<u>Ekonomie:</u> Minimální náklady na provoz	<b>X</b>	

Tabulka 1 – specifikace požadavků [A]

### 3.2 Stanovení funkční struktury

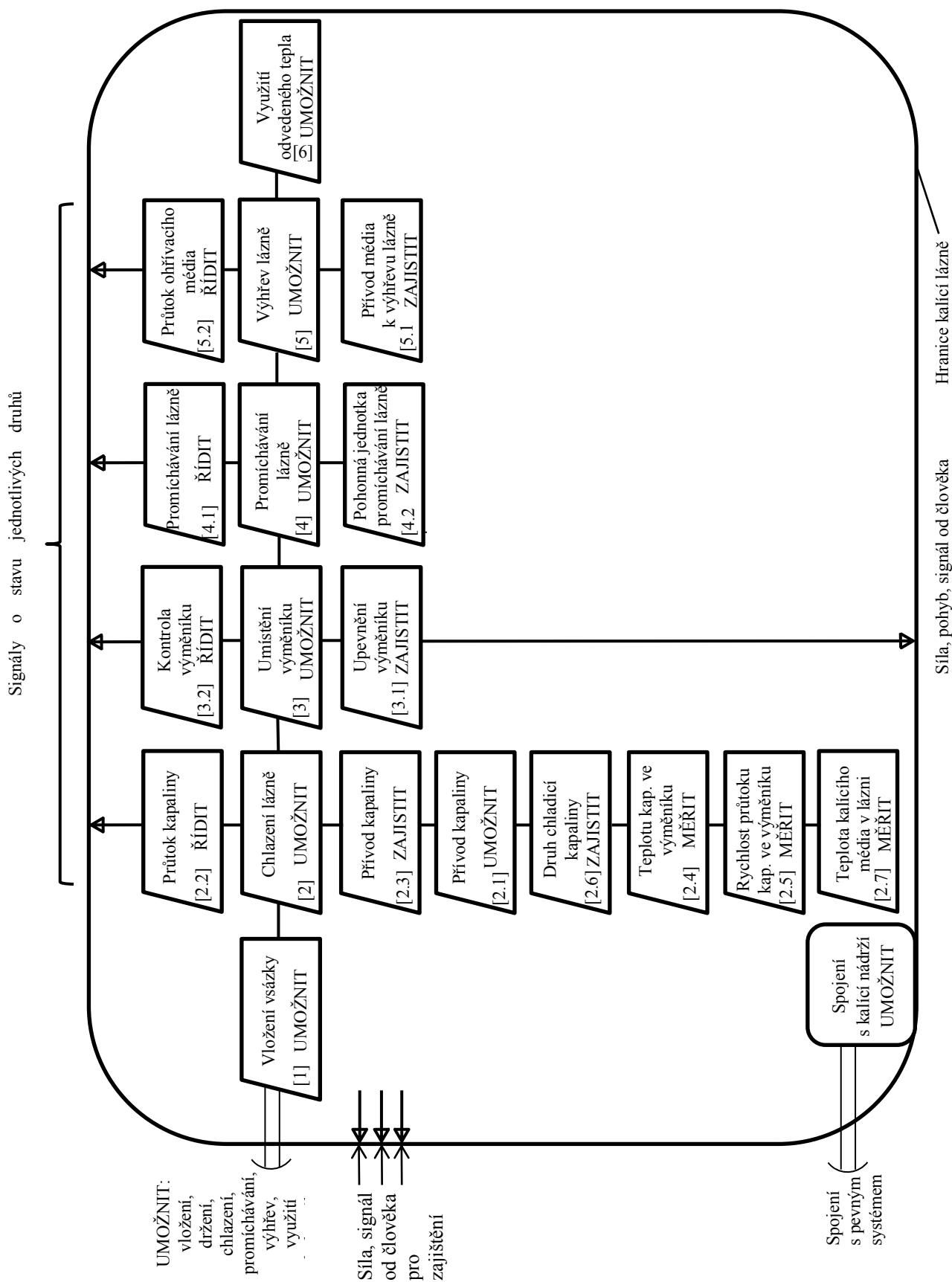


Obr. 5 - Černá skříňka [A]

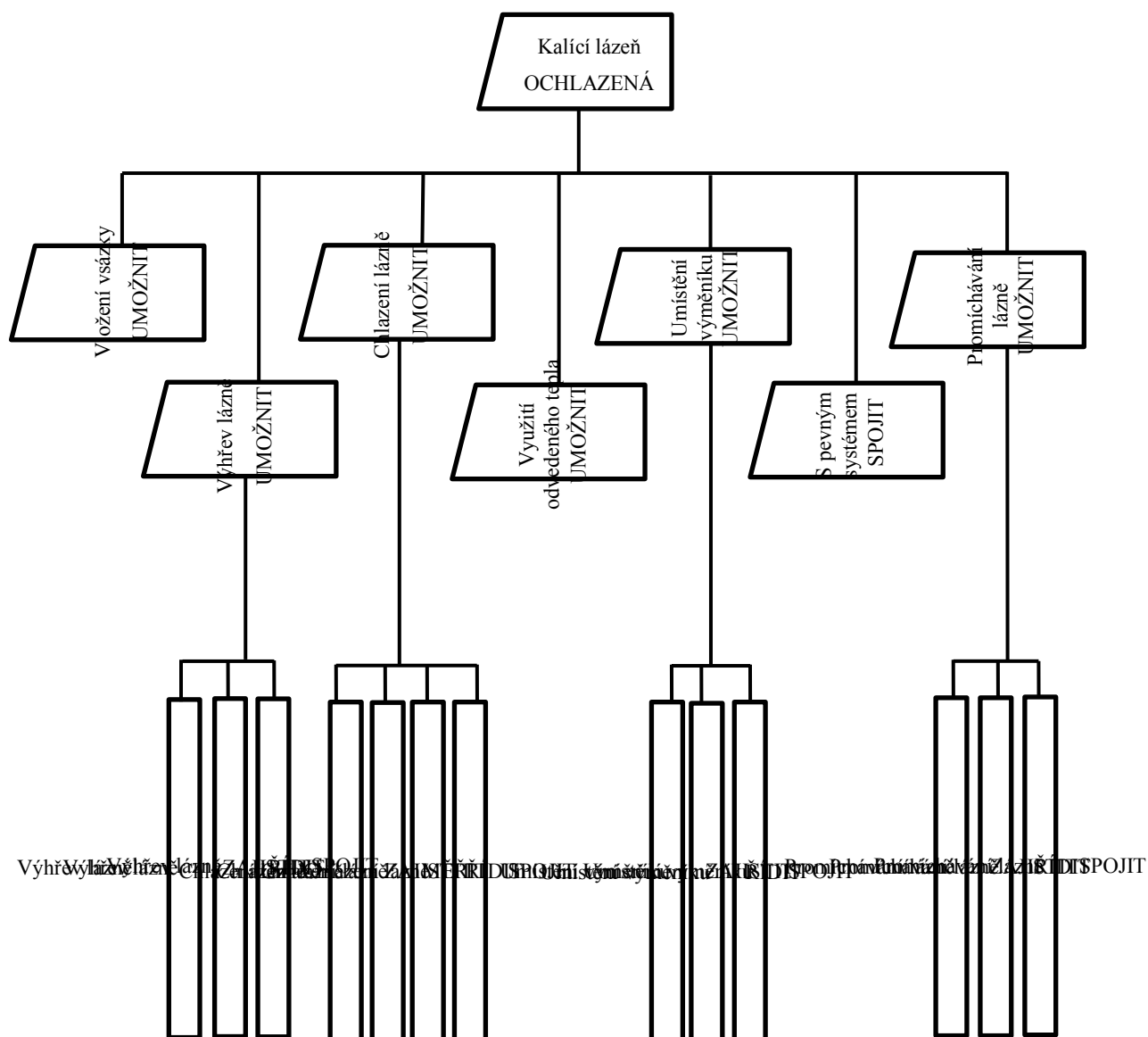


Obr. 6 - Technický proces (blokové schéma) [A]

### 3.3 Stanovení orgánové struktury



Obr. 7 - Funkční struktura (blokové schéma) [A]



Obr. 8 - Funkční struktura (hierarchický funkční strom) [A]

### 3.4 Stanovení hrubé stavební struktury

Dílčí funkce		Funkční principy/ orgány – nositelé funkcí					
		1	2	3	4	5	6
1	Vložení vsázky UMOŽNIT	Jeřáb s hákem					
2	Chlazení lázně UMOŽNIT	Tepelným výměníkem	Trubkovým elementem	Tepelnou trubici	vodou		
3	Držení výměníku UMOŽNIT	tvarem	šrouby				
4	Promíchávání lázně UMOŽNIT	vrtule	Proudem ochlazeného média	vzduchem			
5	Výhřev lázně UMOŽNIT	Plynovými hořáky + víko					
6	Využití odvedeného tepla UMOŽNIT	Užitková voda	Vytápění (radiátory)				
2.1	Přívod kapaliny UMOŽNIT	trubkou	Tlakovou hadicí				
2.2	Průtok kapaliny ŘÍDIT	kohoutek	ventil				
2.3	Přívod kapaliny ZAJISTIT	čerpadlem z olejové nádrže	čerpadlem z vodní nádrže				
2.4	Teplotu kapaliny ve výměníku	ručičkový teploměr	digitální teploměr				

	MĚŘIT						
2.5	Rychlost průtoku kapaliny ve výměníku MĚŘIT	průtokoměr objemový	průtokoměr turbínkový	průtokoměr lopatkový	průtoko- měr bubnový	průtoko- měr průřezo vý	
2.6	Druh chladicí kapaliny ZAJISTIT	voda	Olej ISO VG100				
2.7	Teplota kalicího média v lázni MĚŘIT	teploměr	pyrometr	termovize			
3.1	Upevnění výměníku ZAJISTIT	šrouby	kolíky	klíny			
3.2	Vsunutí výměníku do lázně ŘÍDIT	jeřábem za pomocí joysticku	jeřábem (ručně z kabiny)	není v lázni			
4.1	Promíchávání lázně ŘÍDIT	rychlostí proudem ochl. média	Pneumati- cký motor	kompresor	el.motor		
4.2	Pohonná jednotka na promíchávání lázně ZAJISTIT	šrouby	svařením				
5.1	Přívod média k výhřevu lázně ZAJISTIT	trubkami					
5.2	Průtok plynu ŘÍDIT	ventil	kohoutek	šoupátko			

Obr. 9 - tepelný výměník - morfologická matice [A]



V morfologické matici jsem vypracoval všechny možné kombinace, ze kterých jsem si vypracoval 2 varianty (označeny červenými a modrými čarami) řešeného problému. Jednu ze dvou variant (označena červenými čarami) jsem vypracoval na základě vyřešení problému chlazení kalici solné nádrže pomocí tepelného výměníku.

V tabulce č. 1 jsou schémata vybraných variant, které jsem dále vyhodnotil známkami jako ve škole (1- nejlepší a 5 -nejhorší). Tímto způsobem známkování jsem vyhodnotil, že bude nejlepší varianta A.

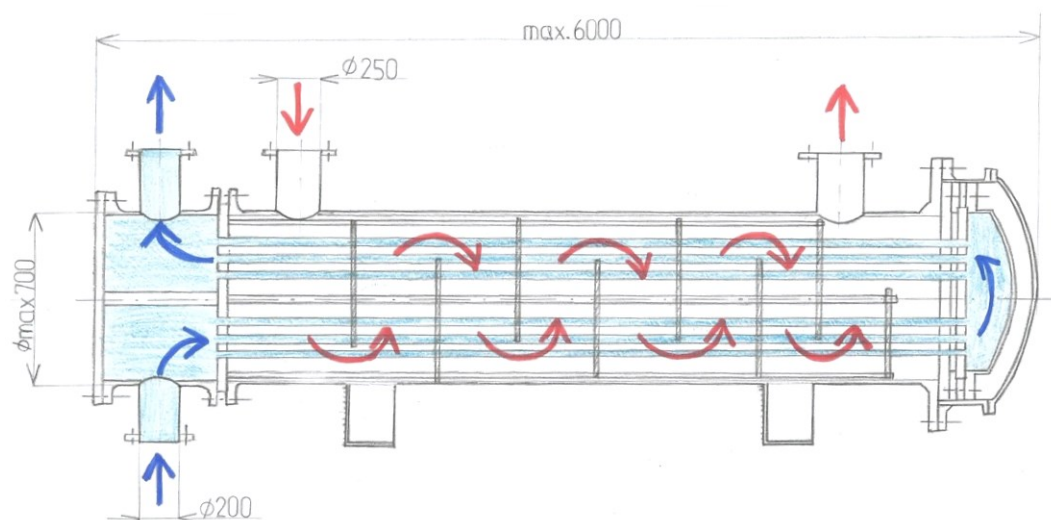
<b>Orgánové struktury</b>		<p>U1 –výstup trubkové kapaliny (olej ISO VG100)  U1' – vstup trubkové kapaliny(olej ISOVG100)  U2 – vstup mezitrubkové kapaliny (sůl AS 140)  U2' –výstup mezitrubkové kapaliny (sůl AS 140)</p>	
<b>Kombinace orgánů nositelů funkcí</b>	fce 1	1	1
	fce 2	1	1
	fce 3	1	2
	fce 4	1	2
	fce 5	1	1
	fce 6	1	2
	fce 2.1	1	1
	fce 2.2	2	2
	fce 2.3	1	2
	fce 2.4	1	3
	fce 2.5	1	2
	fce 2.6	1	1
	fce 2.7	1	1
	fce 3.1	1	2
	fce 3.2	1	1

	fce 4.1	1	2
	fce 4.2	1	2
	fce 5.1	1	1
	fce 5.2	1	2
<b>Hrubé hodnocení</b>	technické nedostatky	-	-
	Výrobní náklady	4	3
<b>Součet bodů</b>		24	34
<b>Celkové pořadí</b>		1.	2.

**Tabulka 2 - Orgánová struktura (koncepční schéma) [A]**

### 3.5 Stanovení úplné stavební struktury

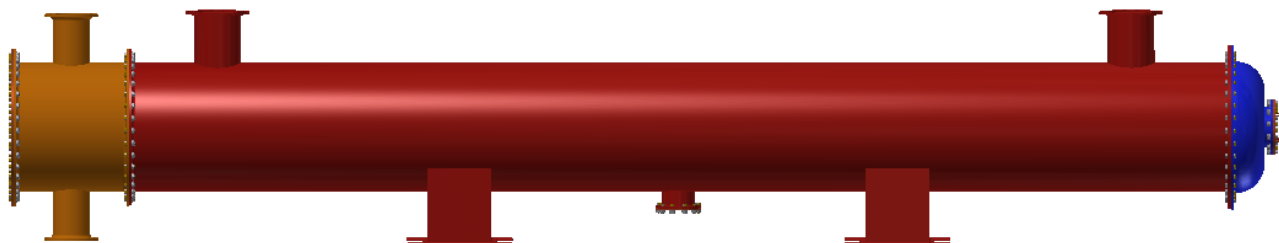
Z koncepčního schéma orgánové struktury jsem vybral lepší ze dvou variant a dále rozpracoval do hrubé stavební struktury. Tuto variantu jsem si vybral pro svou jednoduchost a výrobitelnost. Teplosměnnou plochu výměníku odhaduji na 1000m<sup>2</sup>.



**Obr. 10 - Hrubá stavební struktura [A]**

### 3.6 Detailování úplné stavební struktury

Pohled zepředu:



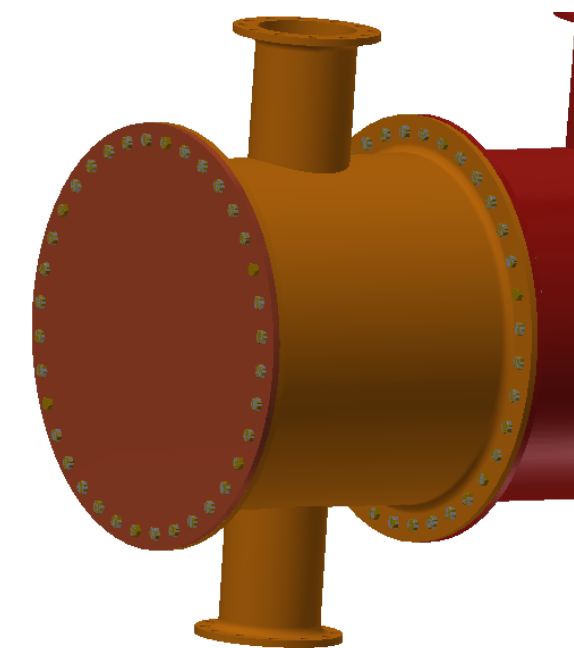
Obr. 11 - Pohled zepředu

Pohled shora:

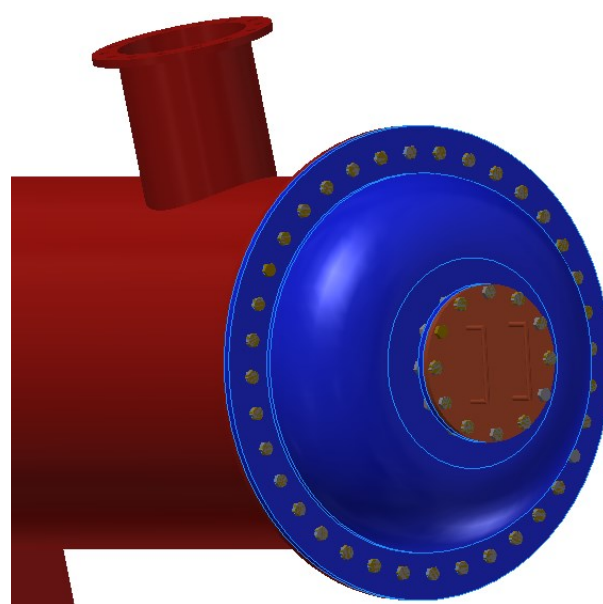


Obr. 12 - Pohled shora

Detail z levé a pravé strany:

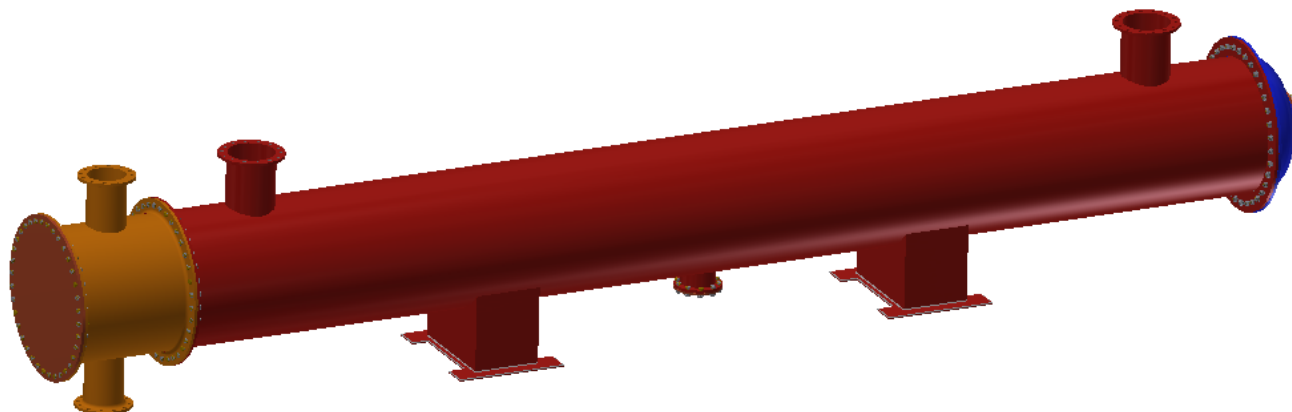


Obr. 14 - detail levé strany výměníku



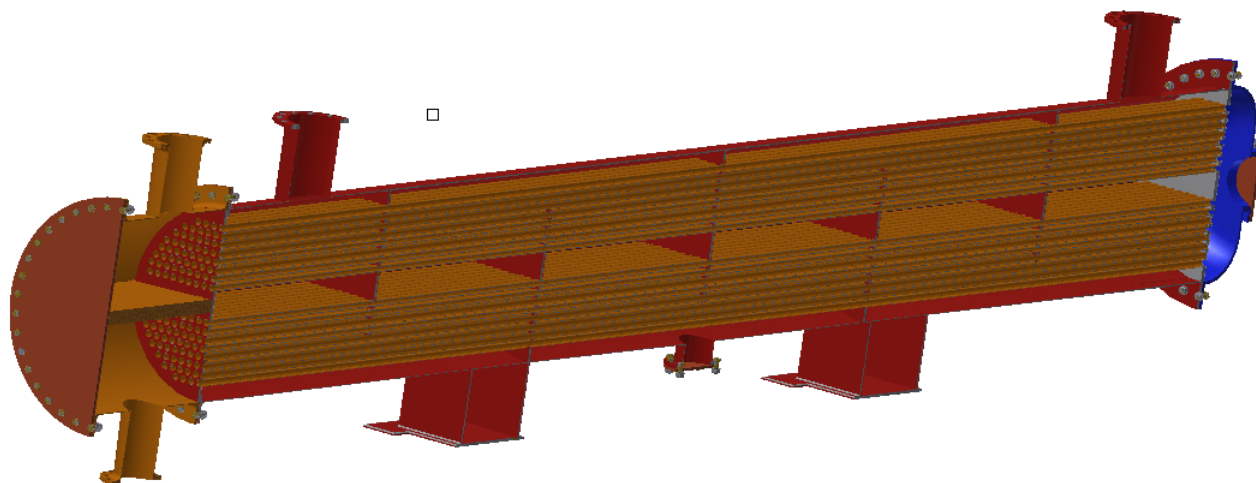
Obr. 13 - detail pravé strany výměníku

3D model výměníku:



Obr. 15 - 3D model výměníku

3D pohled v řezu:



Obr. 16 - Podélný řez výměníkem

## 4. Výpočtová zpráva

### 4.1 Vstupní data

V této kapitole znázorním přehled základních vstupních hodnot pro dimenzování tepelného výměníku. Hodnoty pro tepelně-hydraulický výpočet jsou znázorněna v tabulce č. 3., rovnice termofyzikálních vlastností oleje ISO VG100 v závislosti na teplotě znázorňuje tabulka č. 4. Materiál, použitý pro tepelný výměník je z nelegované žáruvzdorné oceli (ozn. P235GH, EN 10028-2). Používají se pro tlakové nádoby, trubky přepravující horké kapaliny, výrobu kotlů a podobně. Tabulka č. 5 znázorňuje vlastnosti soli AS 140 dle [17].

hmotnost soli AS 140 [Kg]	24836,8
vstupní teplota soli AS 140 [°C]	250
měrná tepelná kap. oceli [ $\text{KJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	0,46
teplota lázně před kalením [°C]	180
teplota lázně po kalení [°C]	250
teplota vsázky před kalením [°C]	950
teplota vsázky po kalení [°C]	250
max. délka tepelného výměníku [m]	6
součinitel tepelné vodivosti trubky (ocel) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	50

Tabulka 3 - vstupní data

hustota [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}; ^\circ\text{C}$ ]	$\rho=910$
tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; ^\circ\text{C}$ ]	$\lambda_o=0,13$
měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ/Kg} \cdot \text{K}; ^\circ\text{C}$ ]	$c_{p_o}=1,89$
kinematická viskozita [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	$\nu_o=100$

Tabulka 4 - termofyzikální vlastnosti oleje ISO VG100, dle [16] [15]

hustota [ $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3};^{\circ}\text{C}$ ]	$\rho=1681,94$
tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1};^{\circ}\text{C}$ ]	$\lambda_0=0,571$
měrná tepelná kapacita [ $\text{kJ/Kg}\cdot\text{K};^{\circ}\text{C}$ ]	$c_p=1,549$
kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	$\nu=6,526\cdot 10^{-7}$

Tabulka 5 - fyzikální vlastnosti soli AS 140

## 4.2 Proudění tekutin v tepelném výměníku

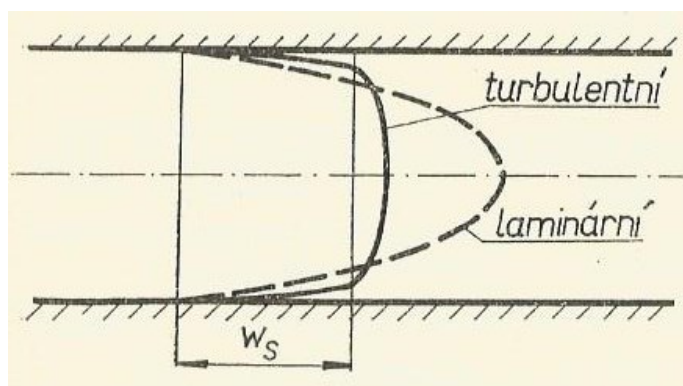
### 4.2.1 Režim proudění

Proudění uvnitř tepelného výměníku ovlivňuje z velké části přestup tepla  $\alpha$ . Proudění se rozděluje do základních režimů: laminární, turbulentní, případně sloučení obou tzv. přechodové. Režim proudění dále ovlivňuje fyzikální vlastnosti proudícího média, tvar tělesa, v níž tekutina proudí a samozřejmě rychlost proudění daného média. Všechny tyto hlediska jsou definovány pomocí Reynoldsova kritéria. Obecně se uvádí kritická hodnota Reynoldsova čísla pro proudění vody v potrubích laminárního režimu, jestliže  $Re < 2320$ , pro přechodnou oblast proudění  $2320 < Re < 10000$  a pro turbulentní proudění  $Re > 10000$ .

Reynoldsovo kritérium udává poměr mezi setrvačnými a viskózními (třecími) silami. V případě, kdy jsou setrvačné síly větší než třecí, má Reynoldsovo číslo vysokou hodnotu. V opačném případě, kdy jsou síly třecí vyšší než setrvačné, má Reynoldsovo číslo hodnotu nízkou. Dosáhne-li Reynoldsovo číslo vyšší hodnoty než 2320, začne se měnit chování proudu v kapalině a začíná docházet k turbulentnímu režimu proudění.

### 4.2.2 Laminární proudění

Laminární proudění se v praxi vyskytuje tam, kde se používají malé průtočné kanály s malými rychlostmi a vyšší viskozity kapaliny, např. v hydraulických mechanismech.



Obr. 17 - Rychlostní proudění laminárního a turbulentního proudění [E]

### 4.2.3 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění se od laminárního proudění liší tím, že částice kapaliny se kromě svého postupného pohybu stálou střední rychlostí proudu konají současně neuspořádaný pohyb i v jiném směru, než je směr postupného proudu. Rychlostní profil je mnohem vyrovnanější než u laminárního proudění, jak je znázorněno na obrázku 11 [E].

## 4.3 Dimenzování tepelného výměníku

Při navrhování trubkového tepelného výměníku, pro účel chlazení kalici lázně jsem vycházel z maximální možné hmotnosti materiálu, které lze v lázni kalit což je 10 000 Kg. Teplota materiálu před kalením byla zvolena 950°C, teplota lázně před kalením jsem zvolil 180°C. Při kalení nám teplota v lázni vystoupala na 250°C. Teplota materiálu při vyjmutí z lázně se vždy rovná teplotě ochlazovacího média, tudíž 250°C.

Při výpočtu musí platit základní vztah pro tepelnou bilanci látky v trubkovém i mezitrubkovém prostoru kalorimetrická rovnice, vycházím z rovnice (1) dle[C]:

$$Q = m_m \cdot c_{pm} \cdot \Delta t_m = \dot{m}_o \cdot c_{po} \cdot \Delta t_o = \dot{m}_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta t_s = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t} \quad [\text{W}] \quad (13)$$

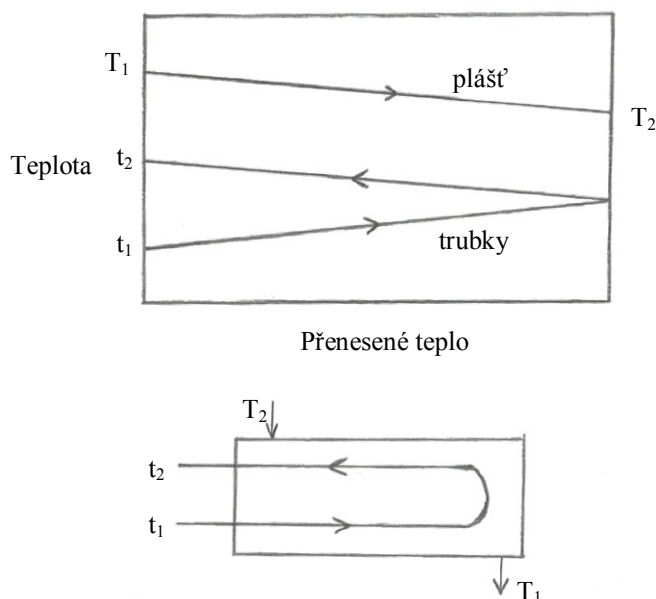
kde:  $m_m = 10\,000 \text{ Kg}$   
 $c_{pm} = 0,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$   
 $\Delta t_m = t_2 - t_1 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $t_{1m} = 250^\circ\text{C}$   
 $t_{2m} = 950^\circ\text{C}$

$$Q = 10\,000 \cdot 0,46 \cdot (950 - 250)$$

$$Q = 3\,220\,000 \quad [\text{W}]$$

Pro výpočet teplosměnné plochy tepelného výměníku je zapotřebí vypočítat střední logaritmický teplotní spád a hodnotu středního součinitele prostupu tepla, který vypočítu v následujících kapitolách.

Obrázek 12 znázorňující vstupní a výstupní teploty v tepelném výměníku. Tyto teploty jsou zapotřebí k vypočtení středního logaritmického teplotního spádu.



Obr. 18 - Průběh teplotního spádu ve výměníku

#### 4.3.1 Výpočet tepelného toku procházející oleje vnitřní trubicí

Rovnice (14) znázorňuje výpočet hmotnostního toku procházející vnitřní trubicí, vycházím z bilanční rovnice (13)

$$\dot{m}_o = \frac{Q}{c_{pOLEJ} \cdot \Delta t_{OLEJ}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14)$$

kde:  $c_{polej} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ... měrná tepelná kapacita oleje

$$c_{po} = 1,89 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$\Delta t_{olej} [^{\circ}\text{C}]$ ... rozdíl teplot na vstupu a výstupu z výměníku, předběžně volím

$$\Delta t_{olej} = 70^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_o = \frac{3220000}{1890 \cdot 70} = 24,34 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Aby dimenzování tepelného výměníku bylo správné, vycházím z kritériálních Nusseltových rovnic (15) a (16) dle [F], ze kterých poté vyjádřím součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . Dále taky mezi výpočtové rovnice tepelného výměníku patří bezpochyby Reynoldsova rovnice (18) a Prandtlovo rovnice (23). Všechny tyto rovnice (15, 16, 18 a 23) jsou tzv. bezrozměrné.



### Nusseltovo kritérium

$$Nu = \frac{\alpha_o \cdot d_2}{\lambda_o} \quad [-] \quad (15)$$

Nusseltovo kritérium lze vyjádřit i rovnicí (19) dle [14], která popisuje turbulentní proudění trubkami, uvažují-li, že Prandtlovo kritérium je  $Pr > 0,7$  a  $Re > 10\,000$ .

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad [-] \quad (16)$$

Z rovnic (15) a (16) byl vyjádřen součinitel přestupu tepla

$$\alpha_o = \frac{0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \lambda_o}{d_2} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (17)$$

Reynoldsovo číslo lze vyjádřit rovnicí (18)

$$Re = \frac{w_o \cdot d_{H2}}{v_o} \quad [-] \quad (18)$$

Rychlost proudění oleje vypočteme z rovnice kontinuity (20), z hmotnostního průtoku (19).

$$\dot{m}_o = w_o \cdot \rho_o \cdot A_2 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (19)$$

$$w_o = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o \cdot A_2} = \frac{\dot{V}}{A_2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (20)$$

$$A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot N_t \quad [m^2] \quad (21)$$

kde:  $A_2 [m^2]$ ... průtočná plocha

$\rho_o [kg \cdot m^{-3}]$ ... hustota oleje při 15°C dle [15].  $\rho_o = 910 kg \cdot m^{-3}$

$d_2 [m]$ ... vnější průměr trubky. Volím 30 mm.

$N_t [m]$ ... počet trubek. Volím 100.

$$A_2 = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 100 = 0,07 m^2$$

$$w_o = \frac{24,33}{910 \cdot 0,07} = 0,38 m \cdot s^{-1}$$

Při dalších výpočtech volím rychlost oleje  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Výpočet hydraulického průměru z rovnice (22), který je potřeba k výpočtu Reynoldsova čísla, abychom zjistili, jaké je v potrubí proudění. [F]

$$d_{H2} = \frac{4 \cdot A_2'}{O} \quad [\text{m}] \quad (22)$$

kde:  $A_2'$   $[\text{m}^2]$ ...průtočná plocha jedné trubky  $A_2'=0,0007 \text{ m}^2$

$O$   $[\text{m}]$ ... obvod průtočné plochy trubky,  $O=0,094 \text{ m}$

$$d_{H2} = \frac{4 \cdot 0,0007}{0,094} = 0,03 \text{ m}$$

Z rovnice (18), Reynoldsova kritéria, vypočítám hodnotu, která nám zjistí, zda je v trubkovém systému turbulentní, laminární nebo přechodové proudění.

$$Re = \frac{w_o \cdot d_{H2} \cdot \rho_o}{\nu_o} [-]$$

kde:  $\nu_o$   $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ ... viskozita oleje při  $40^\circ\text{C}$  dle [15].  $\nu = 100 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$Re = \frac{0,5 \cdot 0,03 \cdot 910}{1 \cdot 10^{-4}} = 136500 [-]$$

Reynoldsovo číslo  $Re > 10\,000$ , z toho plyne, že v trubkovém systému vzniká turbulentní proudění.

Prandtlovo číslo lze vyjádřit rovnicí (23)

$$Pr = \frac{\nu_o}{a_o} \quad [-] \quad (23)$$

kde:  $\nu_o$   $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ ... viskozita oleje při  $40^\circ\text{C}$  dle [15].  $\nu = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$a_o$   $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ ... součinitel teplotní vodivosti oleje

Součinitel teplotní vodivosti oleje lze spočítat pomocí rovnice (24)

$$a_o = \frac{\lambda_o}{c_{po} \cdot \rho_o} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (24)$$

kde:  $\lambda_o$  [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]... součinitel tepelné vodivosti oleje.

$\lambda_o=0,13$  [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>] dle [16].

$$a_o = \frac{0,13}{1,89 \cdot 910} = 7,56 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Pr = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{7,56 \cdot 10^{-5}} = 1,323 [-]$$

Z rovnice (17) vypočteme součinitele přestupu tepla

$$\alpha_o = \frac{0,021 \cdot 136500^{0,8} \cdot 1,323^{0,43} \cdot 0,13}{0,03} = 1316,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.3.2 Výpočet tepelného toku soli AS 140 procházející výměníkem

Z rovnice (25) vypočtu hmotnostní tok soli AS 140, procházející výměníkem. Znovu vycházím z bilanční rovnice (13).

$$\dot{m}_s = \frac{Q}{c_{ps\dot{u}L} \cdot \Delta t_{s\dot{u}L}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (25)$$

kde:  $c_{ps\dot{u}L}$  [J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]... měrná tepelná kapacita Soli AS140 dle [17]

$c_{ps}=1,549$  [kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

$\Delta t_{s\dot{u}L}$  [°C]... rozdíl teplot na vstupu a výstupu z výměníku, předběžně volím

$\Delta t_s=70^\circ\text{C}$

$$\dot{m}_s = \frac{3220000}{1549 \cdot 70} = 29,7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Z kritériálních Nusseltových rovnic zde vyjádřím jako v předchozích výpočtech součinitele přestupu tepla, uvažuji-li, že Prandtlovo kritérium je  $Pr>0,7$  a  $Re>10\,000$ .

$$\alpha_s = \frac{0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \lambda_s}{d_1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (26)$$

Reynoldsovo číslo lze vyjádřit rovnicí (27)

$$Re = \frac{w_s \cdot d_{H1}}{\nu_s} \quad [-] \quad (27)$$

kde:  $w_s$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]... rychlost proudění soli AS 140

$\nu_s$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]... kinematická viskozita soli AS 140

$d_{H1}$  [m]... hydraulický průměr vnější trubky

Rychlost proudění soli AS 140 vypočteme z rovnice (29), vycházím z hmotnostního průtoku (28).

$$\dot{m}_s = w_s \cdot \rho_s \cdot A_1 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (28)$$

$$w_s = \frac{\dot{m}_1}{\rho_s \cdot A_1} = \frac{\dot{V}}{A_1} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29)$$

$$A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (30)$$

kde:  $A_1$  [ $\text{m}^2$ ]... průtočná plocha

$\rho_s$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]... hustota soli AS 140 při 1000°F dle [17].  $\rho_s = 1681,94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$d_1$  [m]... vnější průměr trubky. Podle návrhu dle [G] volím 250 mm.

$$A_1 = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} = 0,049 \text{ m}^2$$

$$w_s = \frac{29,7}{1681,94 \cdot 0,049} = 0,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Při dalších výpočtech volím rychlost soli AS 140  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pro výpočet Reynoldsova čísla, které nám řekne jaké je ve výměníku proudění, musíme spočítat hydraulický průměr, který je roven  $d_1$ . Tudíž  $d_1 = d_{H1} = 0,25 \text{ m}$ .

Z rovnice (27), Reynoldsova kritéria, vypočítám hodnotu, která nám zjistí, zda je v trubkovém systému turbulentní, laminární nebo přechodové proudění.

$$Re = \frac{w_s \cdot d_{H1}}{\nu_s} [-]$$

kde:  $\nu_s$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]... viskozita soli AS 140 dle [17].  $\nu = 6,526 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$Re = \frac{0,5 \cdot 0,25}{6,526 \cdot 10^{-7}} = 191541 [-]$$

Reynoldsovo číslo  $Re > 10\,000$ , z toho plyne, že ve výměníku vzniká turbulentní proudění.

Prandtlovo číslo lze vyjádřit rovnicí (31)

$$Pr = \frac{\nu_s}{a_s} [-] \quad (31)$$

kde:  $\nu_s$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]... viskozita soli AS 140 dle [17].  $\nu = 6,526 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$a_s$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]... součinitel teplotní vodivosti soli AS 140

Součinitel teplotní vodivosti soli AS 140 lze spočítat pomocí rovnice (32)

$$a_s = \frac{\lambda_s}{c_{ps} \cdot \rho_s} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (32)$$

kde:  $\lambda_s$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]... součinitel tepelné vodivosti soli AS 140.

$\lambda_s = 0,571$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] dle [17].

$$a_s = \frac{0,571}{1,549 \cdot 1681,94} = 2,19 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Pr = \frac{6,526 \cdot 10^{-4}}{2,19 \cdot 10^{-4}} = 2,97 [-]$$

Z rovnice (26) vypočteme součinitele přestupu tepla

$$\alpha_s = \frac{0,021 \cdot 191541^{0,8} \cdot 2,97^{0,43} \cdot 0,571}{0,25} = 1288,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 4.3.3 Výpočet teplosměnné plochy

Pro výpočet teplosměnné plochy vycházím z kalorimetrické rovnice (13)

$$Q = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t} \text{ , [W]}$$

Rovnici (33) je vyjádřen výpočet pro střední logaritmický rozdíl teplot.

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \text{ , [}^\circ\text{C, K]} \quad (33)$$

- Výpočet teplotního rozdílu je odvozen z bilanční rovnice (13):

#### Pro olej

$$Q = w_o \cdot A_2 \cdot c_{po} \cdot \rho_o \cdot \Delta t_o \quad [\text{W}] \quad (34)$$

Z rovnice (34) je vyjádřen teplotní rozdíl oleje

$$\Delta t_o = \frac{Q}{w_o \cdot A_2 \cdot c_{po} \cdot \rho_o} \quad [^\circ\text{C}] \quad (35)$$

$$\Delta t_o = \frac{3220000}{0,5 \cdot 0,07 \cdot 1890 \cdot 910} = 53,49 \cong 54 \text{ }^\circ\text{C}$$

Bylo zjištěno, že se olej ve výměníku ohřeje o 54°C.

Výstupní teplota oleje je dána rovnicí (36)

$$\Delta t_o = t_{ovystup} - t_{ovstup} \quad [^\circ\text{C}] \quad (36)$$

kde:  $t_{ovstup}$  [°C]... vstupní teplota oleje,  $t_{ovstup}=30^\circ\text{C}$

$t_{ovystup}$  [°C]... výstupní teplota oleje

Z rovnice (36) vyjádřím  $t_{ov\dot{v}ystup}$

$$t_{ov\dot{v}ystup} = \Delta t_o + t_{ov\dot{v}stup} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (37)$$

$$t_{ov\dot{v}ystup} = 54 + 30 = 84 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

### Pro sůl AS 140

$$Q = w_s \cdot A_1 \cdot c_{ps} \cdot \rho_s \cdot \Delta t_s \quad [\text{W}] \quad (38)$$

Z rovnice (38) je vyjádřen teplotní rozdíl soli AS 140

$$\Delta t_s = \frac{Q}{w_s \cdot A_1 \cdot c_{ps} \cdot \rho_s} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (39)$$

$$\Delta t_s = \frac{3220000}{0,5 \cdot 0,049 \cdot 1549 \cdot 1681,49} = 50,46 \cong 51 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Bylo zjištěno, že se sůl AS 140 ve výměníku ohřeje o 51°C.

Výstupní teplota soli AS 140 je dána rovnicí (40)

$$\Delta t_s = t_{sv\dot{v}stup} - t_{sv\dot{v}ystup} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (40)$$

kde:  $t_{sv\dot{v}stup}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]... vstupní teplota soli AS 140,  $t_{sv\dot{v}stup}=250^{\circ}\text{C}$

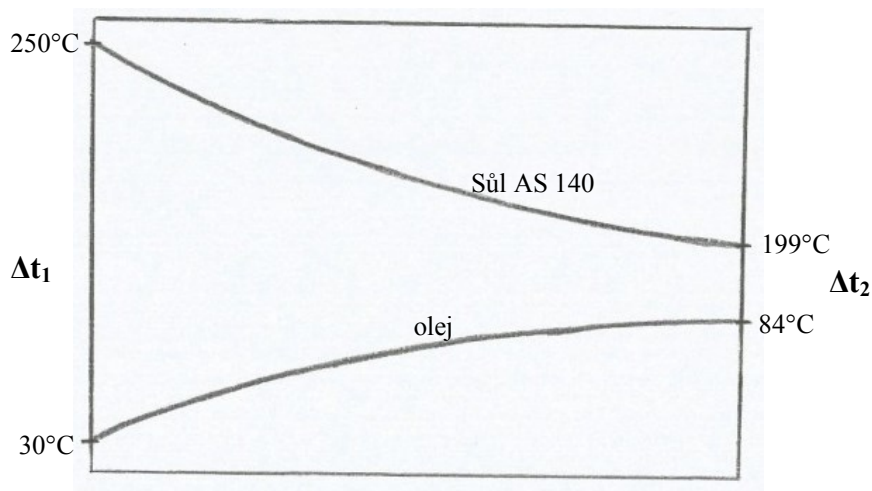
$t_{sv\dot{v}ystup}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]... výstupní teplota soli AS 140

Z rovnice (40) vyjádřím  $t_{sv\dot{v}ystup}$

$$t_{sv\dot{v}ystup} = t_{sv\dot{v}stup} - \Delta t_s \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (41)$$

$$t_{sv\dot{v}ystup} = 250 - 51 = 199 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Dle Obr. 13., vyjádřím teplotní rozdíl  $\Delta t_1$  na vstupu a  $\Delta t_2$  na výstupu.



Obr. 19- Vstupní a výstupní teploty soli AS140 a oleje

Rovnice (42) vyjadřující teplotní rozdíl na vstupu a (43) na výstupu

$$\Delta t_1 = t_{svstup} - t_{ovstup} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (42)$$

$$\Delta t_1 = 250 - 30 = 220 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{svýstup} - t_{ovýstup} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (43)$$

$$\Delta t_2 = 199 - 84 = 115 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Dle rovnice (33) vypočtu střední logaritmický rozdíl teplot

$$\overline{\Delta t} = \frac{220 - 115}{\ln \frac{220}{115}} = 161,8 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Z rovnice (9) vyjádřím střední součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1288,3 \cdot 0,03} + \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot \ln \frac{0,027}{0,03}} + \frac{1}{0,027 \cdot 1316,5}} = 18,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Hodnotu teplosměnné plochy vyjádřím z rovnice (13)

$$S = \frac{Q}{k \cdot \overline{\Delta t}} \quad [\text{m}^2] \quad (44)$$



$$S = \frac{3220000}{18,88 \cdot 161,8} = 1054 \text{ m}^2$$

Potřebnou délku trubky ve výměníku určím rovnicí (45)

$$L = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot N_t} \quad [\text{m}] \quad (45)$$

$$L = \frac{1054}{2 \cdot \pi \cdot 0,015 \cdot 1000} = 11,18 \cong 11,5 \text{ m}$$

#### 4.3.4 Výpočet tlakových ztrát

Tlakové ztráty vznikají při proudění tekutiny a to v celém hydraulickém průměru tak po celé délce potrubí. Celková tlaková ztráta je charakterizována součtem tlakových třecích ztrát a místními odpory.

##### Výpočet tlakových ztrát v trubkovém svazku

Tlaková ztráta třením je vyjádřena rovnicí (11)

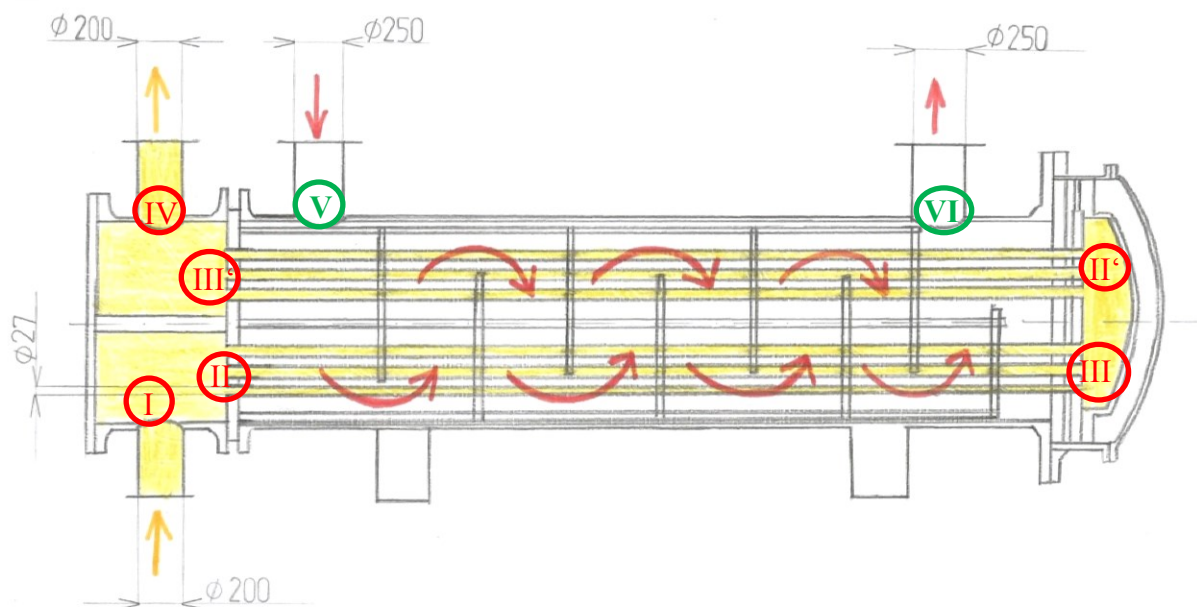
kde:  $f$ ... součinitel tření ocelové trubky dle [13],  $f=0,1$   
 $\rho$ ... hustota oleje,  $\rho=910 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $L$ ... délka potrubí,  $L=11,5 \text{ m}$   
 $w$ ... rychlost proudění oleje,  $w=0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 $d_2$ ... hydraulický průměr trubky,  $d_2=0,027 \text{ m}$

$$\Delta p_{z,tř,o} = \frac{0,1 \cdot 11,5 \cdot 0,5^2 \cdot 910}{0,027 \cdot 2} = 4844,9 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta místními odpory je vyjádřena rovnicí (12)

kde:  $\zeta$ ... ztrátový součinitel místními odpory dle [H],

Ztrátový součinitel místními odpory v trubkách závisí na rychlosti proudění, na druhu místní ztráty a na geometrických parametrech trubky. Na obrázku č. 14 jsou uvedené kritická místa znázorněnými římskými číslicemi (červeně). Pak dále podle rovnice (12) uvedu vypočtené hodnoty do tabulky 6.



Obr. 20 - Znázornění kritických míst ve výměníku

Pro představu, uvedu jeden výpočet pro kritické místo I:

Vycházím ze vzorce (12)

kde:  $w$ ... rychlost proudění oleje,  $w=0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\rho$ ... hustota oleje,  $\rho = 910 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\zeta$ ... ztrátový součinitel místními odpory,  $\zeta=4$  dle [18]

$$\Delta p_{z,m,o,I} = \frac{4 \cdot 0,5^2 \cdot 910}{2} = 455 \text{ Pa}$$

Tabulka s výsledky všech místních a třecích ztrát v trubkovém systému:

Kritické místo	dHo [m]	Rychlost vody [m·s-1]	$\zeta$	$\Delta p_{z,m,o}$ [Pa]	$\Delta p_{z,tř,o}$ [Pa]
I	0,2	0,5	4	455	4844,9
II	0,027	0,5	0,45	51,2	
II'	0,027	0,5	0,45	51,2	
III	0,027	0,5	4	455	
III'	0,027	0,5	4	455	
IV	0,2	0,5	0,25	28,4	
Součet				1495,8	4844,9

tabulka 6 - tlakové ztráty v trubkovém svazku

Celková tlaková ztráta je vyjádřena rovnicí (10)

kde:  $\Delta p_{z,tř,o} \dots$  tlaková ztráta třením dle tabulky 6 je  $\Delta p_{z,tř,o}=4844,9 \text{ Pa}$

$\Delta p_{z,m,o} \dots$  místní tlaková ztráta dle tabulky 6 je  $\Delta p_{z,m,o}=1495,8 \text{ Pa}$

$$\Delta p_{z,c,o} = 4844,9 + 1495,5 = 6340,4 \text{ Pa}$$

Celkové odpory v trubkovém systému jsou 6340,4 Pa, proto je nutné minimálně o tuto hodnotu navýšit vstupní tlak, který nám zajistí čerpadlo. Čerpadlo volím dle [19] CN 65 – 300, sloužící k dopravě olejů. Toto čerpadlo zajistí potřebný průtok a tlak oleje. Maximální provozní tlak čerpadla je  $p_c=1 \text{ MPa}$ .

### Výpočet tlakových ztrát v mezitrubkovém prostoru

Tlaková ztráta třením je vyjádřena rovnicí (11)

kde:  $f \dots$  součinitel tření ocelové trubky dle [13],  $f=0,1$

$\rho \dots$  hustota soli AS 140,  $\rho_s=1681,94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$L \dots$  délka potrubí,  $L=6 \text{ m}$

$w \dots$  rychlost proudění soli AS 140,  $w_s=0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$d_1 \dots$  hydraulický průměr trubky,  $d_1=0,25 \text{ m}$

$$\Delta p_{z,tř,s} = \frac{0,1 \cdot 6 \cdot 0,5^2 \cdot 1681,94}{0,25 \cdot 2} = 504,6 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta místními odpory je vyjádřena rovnicí (12)

kde:  $\zeta \dots$  ztrátový součinitel místními odpory dle [H],

Na obrázku č. 14 jsou uvedené kritická místa znázorněnými římskými číslicemi V a VI (zeleně). Pak dále podle rovnice (12) vyjádřím pro obě kritická místa místní ztráty.

Výpočet pro kritické místo V:

Vycházím ze vzorce (12)

kde:  $w \dots$  rychlost proudění soli AS 140,  $w_s=0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$\rho$ ... hustota soli AS 140,  $\rho_s = 1681,94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\zeta$ ... ztrátový součinitel místními odpory,  $\zeta=4$  dle [18]

$$\Delta p_{z,m,s,V} = \frac{4 \cdot 0,5^2 \cdot 1681,94}{2} = 840,97 \text{ Pa}$$

Výpočet pro kritické místo VI:

kde:  $\zeta$ ... ztrátový součinitel místními odpory,  $\zeta=0,38$  dle [18]

$$\Delta p_{z,m,s,VI} = \frac{0,38 \cdot 0,5^2 \cdot 1681,94}{2} = 79,9 \text{ Pa}$$

Celková místní ztráta je určena rovnicí 46.

$$\Delta p_{z,m,s} = \Delta p_{z,m,s,V} + \Delta p_{z,m,s,VI} = 840,97 + 79,9 = 920,86 \text{ Pa} \quad (46)$$

Celková tlaková ztráta je vyjádřena rovnicí (10)

kde:  $\Delta p_{z,tř,s}$ ... tlaková ztráta třením je  $\Delta p_{z,tř,s}=504,6 \text{ Pa}$

$\Delta p_{z,m,s}$ ... místní tlaková ztráta je  $\Delta p_{z,m,s}=920,86 \text{ Pa}$

$$\Delta p_{z,c,s} = 504,6 + 920,86 = 1425,5 \text{ Pa}$$

Celkové odpory v mezitrubkovém prostoru jsou 1425,5 Pa, proto je nutné minimálně o tuto hodnotu navýšit vstupní tlak, který nám zajistí čerpadlo. Čerpadlo volím dle [20] TCH 100-200. Toto čerpadlo zajistí potřebný průtok a tlak. Maximální provozní tlak čerpadla je  $p_e=1,5 \text{ MPa}$ . Čerpadlo je díky vysoké provozní teplotě soli AS 140 opatřeno dvojitou ucpávkou chlazenou komorou.

## 5. Využití odvedeného tepla

Nevyužití odvedeného tepla z výměníku by bylo moc neefektivní. Proto je dán návrh na využití odvedeného tepla pro ohřev teplé užitkové vody, dále jen TUV. TUV bude pro použití zhruba 50 lidí, kteří na dané hale pracují. Celková potřeba TUV na den jsem zvolil 10m<sup>3</sup>, která dostatečně vystačí pro 50 lidí na den. Teplotu TUV vytékající z kohoutku jsem zvolil 55°C, která je stanovena ve vyhlášce MPO ČR č. 152/2001 Sb., kde se pohybuje v rozmezí 45 až 60°C.

Denní potřeba tepla pro ohřev teplé užitkové vody dle [21] je dán rovnicí 47

$$Q_{TUV} = (1 + z) \cdot \frac{\rho_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot V_p \cdot (t_{2H_2O} - t_{1H_2O})}{3600}, [kW/h] \quad (47)$$

kde:  $z$ ...koeficient energetických ztrát systému,  $z=3$  dle [21]

$\rho_{H_2O}$ ... měrná hmotnost vody,  $\rho_{H_2O}=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$c_{pH_2O}$ ... měrná tepelná kapacita vody,  $c_{pH_2O}=4186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$t_{2H_2O}$ ... teplota ohřáté vody,  $t_{2H_2O}=55 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_{1H_2O}$ ... teplota studené vody,  $t_{1H_2O}=10 \text{ }^\circ\text{C}$

$V_p$ ... celková potřeba teplé vody za 1 den,  $V_p=10 \text{ m}^3/\text{den}$

$$Q_{TUV} = (1 + 3) \cdot \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 10 \cdot (55 - 10)}{3600} = 2093 \text{ kW/h}$$

Potřebné teplo k ohřátí TUV z daných hodnot vyšlo 2093 kW/h. Potřebné teplo nám dodá odvedené teplo z výměníku.

Celková roční potřeba energie na ohřev teplé užitkové vody dle [21] je  $Q_r=763,9 \text{ MWh/rok}$ . Cena 1MWh se v ČR pohybuje kolem 2350kč. Za rok by se tímto způsobem ušetřilo cca 1 795 165 Kč.

### Schéma zapojení celého systému

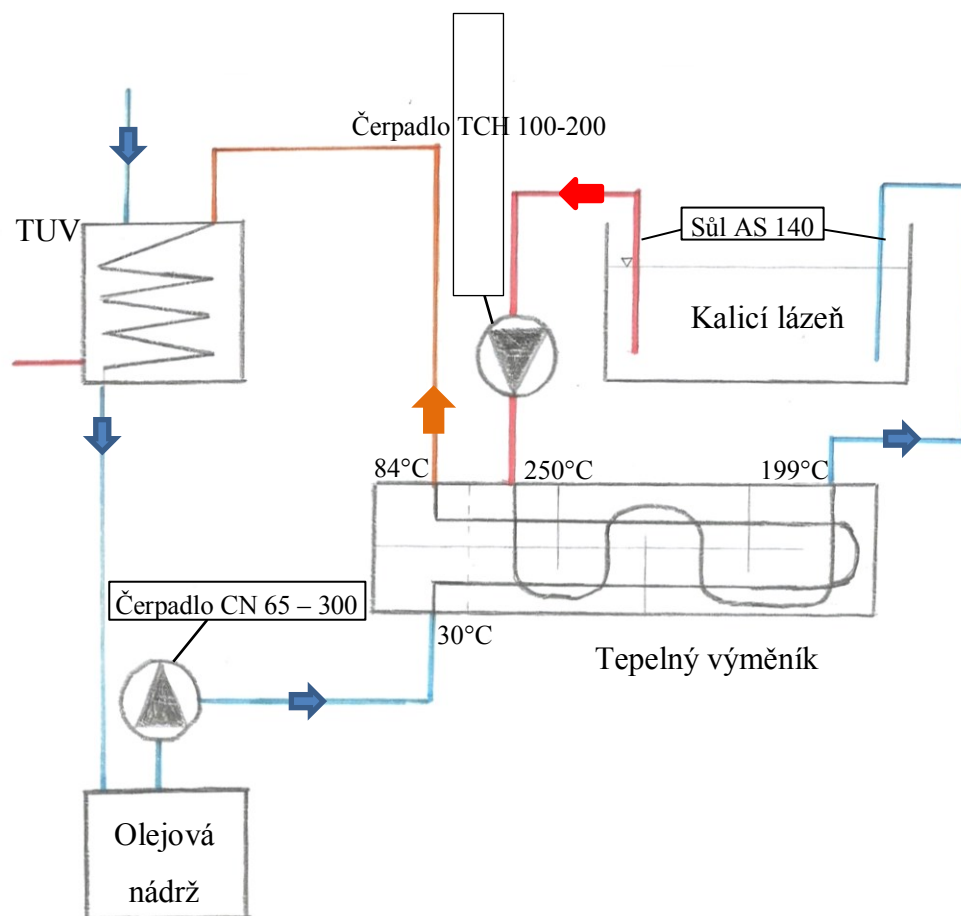


Schéma 5 – systém zapojení

## 6. Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena především na návrh zařízení schopno ochladit solnou kalicí lázeň během kalení. Při návrhu chladicího zařízení jsem vycházel z obecného modelu postupu při konstruování dle [A]. V úvodu jsme se seznámili s problematikou velmi nedokonalého chlazení solné lázně ve firmě Arcelor Mittal a.s. Během návrhu postupu při konstruování byla nakonec vybrána jedna varianta, která byla dle uvážení konstrukčně a výpočtově snadnější a efektivnější.

V dalším bodě bakalářské práce je proveden návrh výpočtu tepelného výměníku, kde bylo dbáno na správné dimenzování výměníku. Byl zde proveden výpočet tepelného toku jak v mezitrubkovém prostoru tak i v trubkovém prostoru. Dále byla vypočtena teplosměnná plocha nezbytná pro navržení 3D modelu tepelného výměníku, který byl vytvořen v softwaru Autodesk Inventor 2014. Nezbytnou součástí celé soustavy je i vhodně zvolené čerpadlo, proto zde byl zahrnut výpočet tlakových ztrát jak na straně oleje, tak i na straně soli AS 140.

Poslední část bakalářské práce se zabývá využitím odvedeného tepla. Z ekonomického hlediska zde byl dán návrh využití odvedeného tepla na ohřev teplé užitkové vody. Při výpočtech dle [21] jsem dospěl k závěru, že při celkové roční potřebě energie v daném regionu by se ušetřilo tímto způsobem zhruba 1,8 mil. korun.

## 7. Seznam výkresové dokumentace

GEL0027\_SESTAVA\_001, A0

## 8. Seznam internetových zdrojů

- [1] Dusitan sodný. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): [http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusitan\\_sodn%C3%BD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusitan_sodn%C3%BD)
- [2] Dusičnan sodný. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11. 1. 2014 v 04:34 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan\\_sodn%C3%BD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan_sodn%C3%BD)
- [3] Dusičnan draselný. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7. 1. 2014 v 15:53 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan\\_draseln%C3%BD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan_draseln%C3%BD)
- [4] Tepelný výměník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 13. 3. 2013 v 15:53 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%BD\\_v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADk](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%BD_v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADk)
- [5] Kalení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7. 8. 2013 v 12:29 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kalen%C3%AD>
- [6] Druhy kalících přípravků. *Azprokal* [online]. 2014 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <http://www.azprokal.cz/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/kalici-oleje-a-polymery/teorie>
- [7] UŽITÍ POLYMERŮ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ. *Ecosond* [online]. 2014, 13.1. 2014 [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: [http://www.ecosond.cz/soubory/Polymery\\_v\\_TZ\\_2006.ps.pdf](http://www.ecosond.cz/soubory/Polymery_v_TZ_2006.ps.pdf)
- [8] *Vodní chlazení solné lázně* [online]. 22.7.2009, 11.12.2013 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=CN&NR=101487078A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20090722&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=CN&NR=101487078A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20090722&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP)
- [9] *Chladič pro kalení lázně* [online]. 9.5.1989, 11.12.2013 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=JP&NR=H0111602>



- 6A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19890509&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en\_EP
- [10] *Chladicí zařízení pro kalení* [online]. 9.1.1986, 11.12.2013 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=21&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=19860109&CC=JP&NR=S613829A&KC=A](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=21&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19860109&CC=JP&NR=S613829A&KC=A)
- [11] *Způsob a chladicí zařízení pro kalení* [online]. 9.1.1986, 11.12.2013 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=JP&NR=S613825A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19860109&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=JP&NR=S613825A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19860109&DB=worldwide.espacenet.com&locale=en_EP)
- [12] *Princip tepelné trubice* [online]. 2010 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.gbconsulting.cz/vymeniky-tepla.html>
- [13] TZB-INFO. *Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí* [online]. 2001 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/87-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubu>
- [14] *Přenos tepla vynucenou konvekcí v trubkách* [online]. 2009 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Termo/Sdileni\\_tepla/Sd%EDlen%ED-pdf/A2%20Sd%EDlen%ED-konvekce.pdf](http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Termo/Sdileni_tepla/Sd%EDlen%ED-pdf/A2%20Sd%EDlen%ED-konvekce.pdf)
- [15] *PARAMO TK 180: Olej pro kalení a teplotonosná media* [online]. 2007, 6.6. 2012 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: [https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/bl10\\_paramo\\_tk180.pdf](https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/bl10_paramo_tk180.pdf)
- [16] Tepelná vodivost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1\\_vodivost](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost)
- [17] HEAT TRANSFER SALT FOR HIGH TEMPERATURE STEAM GENERATION. *HEAT TRANSFER SALT FOR HIGH TEMPERATURE STEAM GENERATION* [online]. 1972 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-TM-3777.pdf>
- [18] HYDROMECHANIKA. *Součinitel místní ztráty* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: [http://www.sps-ko.cz/documents/MEC\\_kratochvil/HYDROMECHANIKA\\_INTERNET/14\\_Ztraty\\_tekutiny\\_mistnimi\\_vlivy.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/MEC_kratochvil/HYDROMECHANIKA_INTERNET/14_Ztraty_tekutiny_mistnimi_vlivy.pdf)

- [19] VK-CERPADLA. *Čerpadla na oleje* [online]. 2014 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.vkcerpadla.cz/cerpadla-na-nizkoviskozni-media.htm>
- [20] AXFLOU. *Odstředivé čerpadla* [online]. 2008 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.axflow.com/cz/site/produkty/kategorie/cerpadla/odstrediva-cerpadla/pompe-travaini-tch/#specification>
- [21] TZB-INFO. *Potřeba tepla pro ohřev teplé vody* [online]. 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-potreba-tepla-pro-vytapani-a-ohrev-teple-vody>

## 9. Seznam použité literatury

- [A] HUBKA, Vladimír. *Konstrukční nauka: obecný model postupu při konstruování*. Překlad Stanislav Hosnedl. Praha: Konservis, 1991, 104 s. Workshop Design Konstruktion. ISBN 80-901-1350-8.
- [B] PETRAŠ, L. *Kalící prostředí pro tepelné zpracování kovů*. Praha: 1962.
- [C] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001, 97 s. ISBN 80-707-8912-3.
- [D] CIKHART, J. *Soustavy centralizovaného zásobování teplem*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1989, 555 s. ISBN 80-030-0021-1.
- [E] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika*. Praha: Academia, 1973, 536 s.
- [F] PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RĚDR. *Sdílení tepla a proudění*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 177 s. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [G] CIKHART, J a A POLANSKÝ. *Výměníky tepla v tepelných sítích*. Praha: SNTL, 1976, 626 s.
- [H] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. ISBN 80-248-0038-1.

## 10. Seznam příloh

Příloha A - Fyzikální a chemické vlastnosti oleje ISO VG100

Příloha B – Vlastnosti Soli AS140

## 11. Seznam obrázků

Obr. 1 – Dusitan sodný [1] .....	10
Obr. 2 - Dusičnan sodný [2] .....	10
Obr. 3 - Dusičnan draselný [3] .....	10
Obr. 4 - princip tepelné trubice [12] .....	17
Obr. 5 - Černá skříňka [A].....	20
Obr. 6 - Technický proces (blokové schéma) [A] .....	21
Obr. 7 - Funkční struktura (blokové schéma) [A] .....	22
Obr. 8 - Funkční struktura (hierarchický funkční strom) [A].....	23
Obr. 9 - tepelný výměník - morfologická matice [A] .....	25
Obr. 10 - Hrubá stavební struktura [A] .....	26
Obr. 11 - Pohled zepředu.....	26
Obr. 12 - Pohled shora .....	26
Obr. 13 - detail pravé strany výměníku.....	26
Obr. 14 - detail levé strany výměníku.....	26
Obr. 15 - 3D model výměníku.....	26
Obr. 16 - Podélný řez výměníkem.....	26
Obr. 17 - Rychlostní proudění laminárního a turbulentního proudění [E].....	26
Obr. 18 - Průběh teplotního spádu ve výměníku .....	26
Obr. 19- Vstupní a výstupní teploty soli AS140 a oleje .....	26
Obr. 20 - Znázornění kritických míst ve výměníku .....	26

## 12. Přílohy

### Příloha A - Fyzikální a chemické vlastnosti oleje ISO VG100 [15]



#### BEZPEČNOSTNÍ LIST

podle nařízení (ES) č. 1907/2006 (REACH), ve znění nařízení komise (EU) č. 453/2010

Název výrobku: **PARAMO TK 180**

Datum vydání: 29. 8. 2007

Datum změny: 6. 6. 2012 (N2)

**Ochrana dýchacích cest:** není nutná, pokud koncentrace par ve vzduchu nepřekročí koncentrační limity. V případě překročení, resp. při tvorbě aerosolu použít únikovou masku s filtrem A, AX (hnědý) nebo jiný vhodný typ proti organickým plynům a parám organických látek.

**Tepelné nebezpečí:** Není.

**Omezování expozice životního prostředí:** Je třeba zamezit úniku do životního prostředí všemi dostupnými prostředky.

#### ODDÍL 9: FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

##### 9.1 Informace o základních fyzikálních a chemických vlastnostech

Vzhled: kapalina  
Barva: hnědá  
Zápach (vůně): bez zápachu  
Prahová hodnota zápachu: nestanoveno  
pH: nestanoveno  
Bod tekutosti: pod -6 °C  
Počáteční bod varu a rozmezí bodu varu: nestanoveno  
Bod vzplanutí OK: nad 215 °C  
Rychlost odpařování: nestanoveno  
Hořlavost (pevné látky, plyny): IV. třída nebezpečnosti  
Horní/dolní mezní hodnoty hořlavosti nebo výbušnosti: za běžných podmínek netvoří výbušné páry  
Tlak páry: < 10 Pa při 20 °C  
Hustota páry: vzhledem k nízkému tlaku par se nestanovuje  
Relativní hustota: 910 kg/m<sup>3</sup> při 15 °C  
Rozpustnost: nerozpustný ve vodě  
Rozdělovací koeficient: n-oktanol/voda: nestanoveno  
Teplota samovznícení: nad 340 °C  
Teplota rozkladu: nestanoveno  
Viskozita: 90 až 110 mm<sup>2</sup>/s při 40 °C  
Výbušné vlastnosti: není výbušný  
Oxidační vlastnosti: není oxidující

##### 9.2 Další informace

Bod hoření: nad 250 °C  
Výhřevnost: nestanoveno

#### ODDÍL 10: STÁLOST A REAKTIVITA

**10.1 Reaktivita:** Není reaktivní.

**10.2 Chemická stabilita:** Při předepsaném způsobu skladování je přípravek stabilní.

**10.3 Možnost nebezpečných reakcí:** K nebezpečným reakcím nedochází.

**10.4 Podmínky, kterým je třeba zabránit:** Zahřátí na vysokou teplotu, přítomnost zdrojů vznícení, styk s otevřeným ohněm.

**10.5 Neslučitelné materiály:** Silná oxidační činidla.

**10.6 Nebezpečné produkty rozkladu:** Za normálních podmínek žádné, při hoření za nedostatku vzduchu možný vznik oxidu uhelnatého.

#### ODDÍL 11: TOXIKOLOGICKÉ INFORMACE

##### 11.1 Informace o toxikologických účincích látky/směsi

**Akutní toxicita:** orální toxicita (potkan) LD<sub>50</sub> > 5 000 mg/kg (OECD TG 401)

**Příloha B – Vlastnosti Soli AS140 [17]**

**TABLE I**

<b>COMPARISON OF "HITEC" AND AIR AS HEAT TRANSFER FLUIDS</b>			
Basis of Comparison:			
Fluid Conduit: 1" I.D. Tubes			
Average Fluid Temperature: 800°F.			
Pressure Drop due to Friction: 3.5 lbs./sq.in./100 ft. of tubing			
Difference between inlet and outlet fluid temperatures: 50°F.			
	<b>"HITEC"</b>	<b>AIR</b>	
		<b>at 3 atm.press.</b>	<b>at 10 atm.press.</b>
Press. drop./100 ft. . . . .	3.5 lbs./sq.in.	3.5 lbs./sq.in.	3.5 lbs./sq.in.
Lbs./hr./tube . . . . .	6000	185	360
Heat carrying capacity/tube . . . . .	111,900 B.T.U./hr.	2310 B.T.U./hr.	4500 B.T.U./hr.
No. of 1" tubes required to transfer 111,900 B.T.U./hr. at 50°F. temperature difference . . . . .	1	48½	25
Total lbs./hr. . . . .	6000	8970	8970
Theoretical HP required to overcome friction . . . . .	0.014	24.1	7.2
Individual coefficient of heat transfer . . . . .	858	28	40

	<sup>7</sup> LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>	NaF-NaBF <sub>4</sub>	<sup>7</sup> LiF-BeF <sub>2</sub>	KNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>2</sub> -NaNO <sub>3</sub>
Composition, mole %	71.7-16-12-0.3	92-8	66-34	44.2-48.9-6.9 <sup>a</sup>
Molecular weight, approximate	64	104	33	84
Density, lb/ft <sup>3</sup> at 1000°F	212	117	124	105
Viscosity, lb/ft-hr at 1000°F	41	3	29	3
Specific heat, Btu/lb-°F	0.32	0.36	0.57	0.37
Thermal conductivity, Btu/ft-hr-°F	0.67 to 0.68	0.23	0.58	0.33
Estimated cost, \$/lb	57.00	0.50	12.00	0.15
Circulation required per loop <sup>b</sup> for 556-MW(t) heat load:				
lb/hr	23.4 x 10 <sup>6</sup>	18.3 x 10 <sup>6</sup>	13.3 x 10 <sup>6</sup>	14.7 x 10 <sup>6</sup>
gpm	14,260	19,500 <sup>c</sup>	13,380	17,370
Liquidus temperature, °F	930	725	850	288

<sup>a</sup>Eutectic composition.

<sup>b</sup>Based on properties at average temperatures in MSBR system.

<sup>c</sup>Based on 250°F Δt in modified MSBR.